

НАУКА
И ПРОГРЕСС

Ю. ЧИРКОВ

ЛЮБИМОЕ ДИТЯ ЭЛЕКТРОХИМИИ

Издательство
"Знание"
Москва



НАУКА
И ПРОГРЕСС

Ю. ЧИРКОВ

ЛЮБИМОЕ ДИТЯ ЭЛЕКТРОХИМИИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ЗНАНИЕ"
МОСКВА
1985

ББК 31.2
Ч64

ЧИРКОВ Юрий Георгиевич, доктор химических наук, старший научный сотрудник Института электрохимии АН СССР, по образованию физик-теоретик, окончил Московский инженерно-физический институт. Не оставляя научной работы, активно занимается популяризацией научных знаний — печатался в «Правде», журналах «Наука и жизнь», «Знание — сила». Автор научно-популярных книг «Фотосинтез: два века спустя» и «Занимательно об энергетике».

Научная редакция директора Института электрохимии им. А. Н. Фрумкина АН СССР доктора химических наук, профессора ***В. Е. Казаринова***

Рецензент: Корякин Ю. И., доктор экономических наук, профессор.

Чирков Ю. Г.

Ч64 Любимое дитя электрохимии.— М.: Знание, 1985.— 176 с.

35 к. **50 000 экз.**

В 30-х годах прошлого столетия У. Гров открыл способ прямого преобразования химической энергии в электричество путем так называемого «холодного горения» топлива. Его водородно-кислородный топливный элемент положил начало поискам по созданию эффективных электрохимических генераторов, обладающих таким важным достоинством, как экологическая чистота.

В книге рассказывается история топливных элементов, принципы их работы и те трудности, которые пока не позволили «любимому дитяти» электрохимии занять подобающее место в энергетике.

Для широкого круга читателей.

$Ч \frac{2302010000-006}{073(02)-85} 27-85$

ББК 31.2
6П2.1

Предисловие

Если вам подают кофе, то не старайтесь искать в нем пива.

А. П. Чехов

В этой книге разговор пойдет о разном — об энергетике и ее нелегких проблеммах, об уже зрелой науке электрохимии и совсем «зеленых» научных направлениях: биоэнергетике (как живая клетка обходится без электростанций) и электрокатализе (новейшая ветвь катализа) Будут обсуждены животрепещущие вопросы: что мешает приходу электромобиля, почему футурологам так трудно написать сценарий нашего Завтрашнего Дня. Тропами лилипутов читатель попадет в Страну Пор. Расскажет эта книга и еще о многом, многом другом. А объединяют все это многоцветье тем, скрепляют их, вяжут в единый узел электрохимического толка технические устройства, получившие название топливных элементов.

Автор книги — электрохимик, успехи и заботы этой науки ему наиболее близки и наиболее его волнуют. И он хочет напомнить читателю тот факт, что уже почти два столетия различные электрохимические генераторы тока — гальванические элементы, электрические аккумуляторы — снабжают людей электроэнергией. Делали они это и тогда, когда современных тепловых электростанций — ТЭЦ, ГЭС, ГРЭС — не было и в помине.

Но даже тогда (конец XIX века), когда тепловые станции появились и по-новому решили проблему энергообеспечения, возиикали справедливые мысли о том, что самую важную из проблем техники — проблему получения энергии — можно решить и другим, электрохимическим путем.

И речь тут шла именно о топливных элементах, о том, что необходимо на их основе создать особую «электрохимическую энергетику», что с ее помощью с очень малыми тепловыми потерями, с кпд (современные данные), приближающимся к 70—80 процентам (кпд лучших тепловых и атомных электростанций лишь 30—40 процентов), химическую энергию топлива — угля, нефти, горючего газа — можно будет непосредственно преобразовывать в электричество.

Заманчиво? Несомненно. Однако техника начала нашего века выбрала иной, менее совершенный путь. Причины? Сыграли роль экономические — в частности, дешевизна нефти — и эксплуатационные и многие другие соображения (обо всем этом будет подробно рассказано в книге).

Но ничто не вечно под Луной! Сейчас, когда органическое топливо быстро дорожает и запасы его на планете истощаются, основанная на тепловых машинах энергетика переживает серьезный кризис.

К счастью для человечества, энергетическую эстафету подхватил Атом. Атомная энергетика у нас в стране развивается невиданными темпами. Но является ли она окончательным решением всех энергетических проблем? Вряд ли. Недаром физики так настойчиво пытаются овладеть термоядерной энергией, неспроста делаются попытки строить на земле солнечные электростанции, хотя они еще и очень дороги, подумывают и о сооружении гелиоэлектростанций в космосе. Имеются большие резоны для использования тепла земных недр. Экологические — забота об охране окружающей среды, экономические и

некоторые другие соображения заставляют энергетиков всемерно расширять спектр энергетических установок.

Вот характерные слова, сказанные одним из ведущих энергетиков нашей страны, академиком М. А. Стыриковичем:

«Сейчас в энергетике появляется много свежих идей, и надо очень внимательно относиться к их рассмотрению. При этом очень важно не ограничиваться общими оценками, реже употреблять слово «очевидно», которым часто маскируют отсутствие аргументации, а попытаться подойти к проблеме с серьезной количественной технико-экономической оценкой».

Все говорит за то, что климат наших дней благоприятствует приходу и электрохимической энергетики, о которой ученые впервые заговорили еще 90 лет назад. Ведь эта энергетика экологически чиста, высокоэффективна, позволяет создавать замкнутые циклы по переработке вещества и топлива, здесь можно комплексно использовать сырье, такие электростанции можно строить непосредственно в крупных городах и т. д. и т. д.

Подчеркнем: речь идет не просто о химических источниках тока, всех этих столь незаменимых для автотранспорта, электротехники и радиоэлектроники автономных устройствах, которые сейчас выпускаются в мире в неимоверных — десятки миллиардов штук в год! — количествах, обо всем, что получило название Малой энергетики. Нет, мы говорим об энергетике Большой. Именно в ней электрохимическая энергетика на топливных элементах хочет получить все права гражданства. И уже в ряде стран начато строительство первых пробных электростанций мощностью в 5 МВт.

В деле создания все более совершенных топливных элементов, в подыскании для них достойного места в Большой энергетике заслуги русских и советских ученых очень велики. Созданная в нашей стране академиком А. Н. Фрумкиным (1895—1976) школа электрохимиков лидирует в мировой науке. Сам Фрумкин отдал электрохимической энергетике многие десятилетия своей жизни.

Сейчас в СССР координатором всех работ по этой проблеме является созданный в 1980 году научный совет по электрохимии Отделения общей и технической химии АН СССР, его возглавил академик Я. М. Колотыркин. Головным по теоретическим проблемам является Институт электрохимии АН СССР. Технико-производственные вопросы решаются во многих прикладных институтах, находящихся в разных городах нашей страны, но ведущим здесь является Всесоюзный научно-исследовательский институт источников тока (ВНИИТ), им руководит член-корреспондент АН СССР Н. С. Лидоренко.

Первых специалистов по электрохимической энергетике недавно начал выпускать Московский энергетический институт.

Но эта книга рассказывает не только о полной драматизма и превратностей, взлетов (топливные элементы уже побывали в космосе, добрались они и до Луны!) и неудач электрохимической энергетике, когда топливные элементы обходили их более могучие и удачливые конкуренты. В книге показано еще, как замечательная научно-техническая идея топливных элементов оказалась созвучной самым сокровенным мыслям других областей науки и техники (к примеру, четко обозначились параллели — структурные и функциональные — между топливным элементом и зеленым листом).

Глава 1,

историческая: о падениях и взлетах, которые претерпело техническое устройство, получившее позднее несколько неуклюжее название — топливный элемент

Холодное горение

Бесконечные явления, которые представляются нам в настоящее время новыми, были предметом размышлений и опытов прежних исследователей, и, с другой стороны, в старой литературе заключены бесконечные наблюдения и мысли, которые могут воскреснуть к новой жизни...

В. Оствальд, 1896

Рассказывают...

Однажды Фарадей читал лекцию об электромагнитной индукции. После эксперимента с вращением магнита вокруг прямого провода с током одна любознательная дама задала вопрос:

— Господин профессор, даже если вы и достигнете того, о чем говорите, то какой в этом прок?

— Мадам,— ответил ученый,— можете ли вы мне сказать, какой прок от новорожденного ребенка?..

Увы! Не всякое значительное научное открытие оказывается таким везучим: на явлении электромагнитной индукции покоится теперь вся электротехника и многое иное, что прочно вошло в бытие современного человека. В этом смысле топливный элемент (а именно о нем сейчас пойдет речь) можно смело сравнить с миной замедленного действия. «Взрыв» состоялся лишь спустя полтора столетия после открытия. Только тогда (в наши дни) достоинства топливного элемента заговорили о себе в полный голос.

ОТКРЫТИЕ ГРОВА

ГРОВ (1811—1896) *, английский электрохимик, адвокат по профессии, закончил Оксфорд в 1835-м. Слабый здоровьем, он не пожелал заниматься адвокатурой, предпочел тишину кабинета и занятия джентльмена-экспериментатора. Изобретенный им в 1839 году «элемент Грова» сделал его членом лондонского Королевского общества.

---

* Другое написание фамилии по-русски — Гроув.

Гров был ярым сторонником закона сохранения энергии (видимо, поэтому в справочниках он всюду значится как английский физик), профессорствовал в лондонском Королевском институте. В зрелые годы здоровье Грова окрепло настолько, что он вернулся к адвокатской деятельности. В 1871 году был назначен судьей, а год спустя возведен в рыцарское достоинство (knight, род личного дворянства с титулом «сэр»).

Сейчас, когда наука требует долгого обучения, дорогостоящего оборудования, коллективных усилий и многого иного, нам трудно себе это представить: профессиональный юрист, успешно (в часы досуга!) подвизающийся на ученом поприще. И даже внесший значительный вклад в исследования.

Да, днем заседания в суде, дела клиентов. А по вечерам, сбросив судейскую мантию, Уильям Роберт Гров отдавал свой досуг любимой науке — электрохимии. И занятия эти шли столь успешно, что сейчас, собственно, помнят не юриста Грова, а Грова-электрохимика.

В 1839 году в январском номере «Философского журнала» Гров описал опыт: стрелка гальванометра отклонялась, когда его соединяли с двумя платиновыми полосками, полупогруженными в сосуд с разбавленной серной кислотой; одна полоска обдувалась водородом, другая — кислородом.

Так был создан первый топливный элемент — водородно-кислородный...

Итак, читатель, мы стоим у истоков долгой и сложной истории. Задержимся здесь, попробуем разобраться, что все-таки произошло.

Прежде всего заметим, что открытие сделано было, видимо, случайно. Ведь целью Грова было произвести разложение воды (точнее, раствора серной кислоты) электрическим током на водород и кислород.

То, что процесс может идти и в обратную сторону (водород и кислород, соединившись, образуют воду) и что при этом получается электрический ток, для Грова было явлением побочным. И сообщение об этом было помещено в постскриптуме к статье, как бы между прочим.

Не сразу ученый и его современники осознали: в науке произошло событие значительное.

Электрохимические элементы (батареи), генерирующие ток, были известны и до этого. Но в них «сжигались» довольно дорогие металлы: цинк, свинец, никель.

Насколько дешевле было бы электрохимически жечь водород, лучше — натуральный газ, еще лучше — уголь. Так же, как издревле человек привык жечь хворост и дрова.

А ведь именно эту возможность, казалось бы, и предоставлял элемент Грова. В нем топливо (водород) сжигалось (соединялось с кислородом) до конечного продукта — воды. И, что самое удивительное, человек впервые получал при сжигании обычного топлива не тепло, а сразу электрический ток.

Однако опыты Грова не произвели тогда на ученых большого впечатления: слишком ничтожны были снимаемые с элемента токи. Элемент выглядел лабораторным курьезом, не более. Любопытно, занимательно, но практического применения не имеет!

Но постойте, мы совсем забыли: новорожденный требует имени.

Академик Владимир Александрович Фок как-то заметил: «Эйнштейн, как и Колумб, сделал великое открытие, но неверно его истолковал. Об этом нам напоминает название «общая теория относительности», которое столь же мало подходит для теории тяготения, как название «Вест-Индия» для далеких от Индии островов».

Вначале новинку окрестили «элементом Грова». Но затем, когда выяснилось, что сжигать можно не только водород, но и уголь, и другие топлива, было дано другое название: fuel cell, что в переводе с английского на русский и стало словами «топливный элемент».

«Что значит имя? Роза пахнет розой...» Так сказал Шекспир. Так думают поэты. Ученые же и инженеры придерживаются несколько иных взглядов. Они требуют точности, чтобы в имени того или иного вещества, прибора, явления были отражены их наиболее характерные свойства.

В этом деле немецкий язык имеет явные преимущества перед другими языками. Именно для него характерно слияние многих слов в одно, по поводу чего иронизировал Марк Твен. Иные немецкие слова «так длинны,— писал он,— что видишь их в перспективе». Вот одно из них: Generalstaatsverordnetenversammlungen, что означает, по мнению Марка Твена, «Общиепредставителейзаконодательнойпалатысобрания», а попросту «Сессии законодательной палаты».

Это свойство немецкого языка чрезвычайно удобно для образования научных и технических терминов. Вот пример. Слово Zinkstaub — und Chlorkaurschukanstrichstoffe в переводе с немецкого значит всего-навсего: «Материалы для покрытия на основе цинковой пыли и хлористого каучука». И только!

Но даже немцы (они нарекли топливный элемент именем Brennstoffelement — «элемент для сжигания вещества») не справились с задачей. Не смогли выявить, так сказать, квинтэссенцию, соль, суть этого замечательного устройства. И это, видимо, не их вина: слишком сложной оказалась природа этого изобретения — мы убедимся в этом дальше.

Но так или иначе, плохо или хорошо, а дело было сделано: «дитя» получило имя.

ЧТО ГОРИТ В ТОПЛИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

Яростное пламя клокочет в топке гигантского — высотой с восьмиэтажный дом — парового котла электростанции. А что такое пламя? В чем физическая сущность процесса обычного горения?

Топливо (дрова в костре, разведенном туристами, уголь, нефть) состоит в основном из углерода. При горении его атомы теряют электроны; атомы кислорода (окислитель, необходимая компонента процесса горения), наоборот, приобретают их. Так в процессе окисления атомы углерода и кислорода соединяются в продукты горения — молекулы углекислого газа.

Этот процесс, изложенный здесь упрощенно, идет энергично: атомы и молекулы веществ, участвующих в горении, приобретают большие скорости, а это означает весьма значительное повышение их температуры. Они начинают испускать свет, появляется видимое нами пламя.

Передача электронов при горении происходит хаотически, неупорядоченно. Вся химическая энергия системы переходит в неполноценную (в смысле эффективности дальнейших преобразований) тепловую энергию.

Горение — обмен электронов между атомами. А ведь электрический ток — тоже движение электронов, только упорядоченное. И вот возникает еретическая мысль: нельзя ли так организовать горение, чтобы сразу получать электрический ток? Добиться управления движением

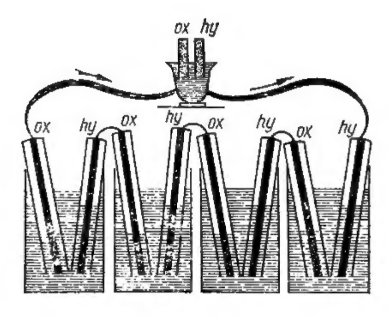
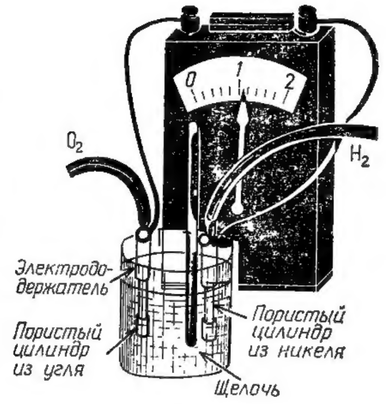


Схема первого топливного элемента (из статьи Грова, 1839): Сначала проводят электролиз, в результате которого в перевернутых пробирках над платиновыми электродами собирается водород (hy) и кислород (ox); если после электролиза замкнуть цепь, то по ней пойдет электрический ток



Схематическое изображение демонстрационной модели водородно-кислородного топливного элемента

электронов. Не дозволять электрически заряженным ионам в хаосе столкновений растрачивать свою электрическую энергию, не дать ей превращаться в тепло.

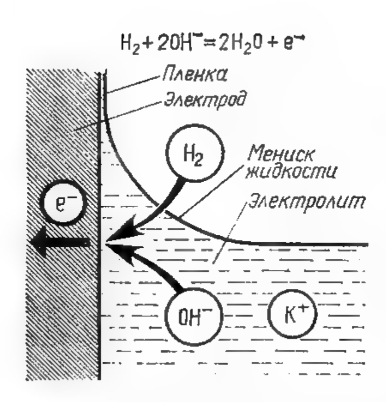
Итак, возможно ли холодное горение, организованное и упорядоченное? Оказывается, да. Вспомним опыт Грова. Он сжигал в кислороде водород. Этот процесс известен нам еще со школьной скамьи. Смесь двух объемов водорода и одного объема кислорода называется гремучим газом. Если поджечь эту смесь, она взрывается.

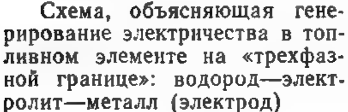
Пока это обычное горение водорода. Химик запишет эту реакцию так:

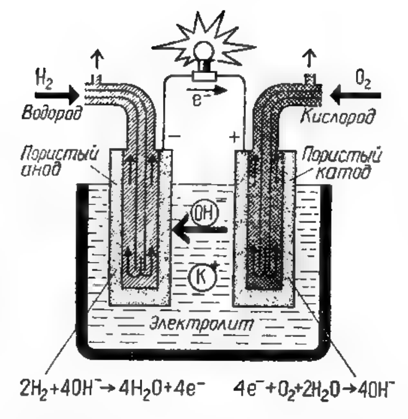
$$2\,H_2 + O_2 = 2\,H_2O + \text{тепло}. \qquad (1)$$

Две молекулы водорода, соединившись с молекулой кислорода, образовали две молекулы воды. Перед нами пример химической реакции, которая сопровождается выделением тепла.

Но можно ли повернуть дело так, чтобы в ходе реакции генерировалось электричество — электроны (их бу-




Схема, объясняющая генерирование электричества в топливном элементе на «трехфазной границе»: водород—электролит—металл (электрод)



Водородно-кислородный топливный элемент: включенная во внешнюю цепь «газового элемента Грова» лампочка горит

дем обозначать символом e^-)? Можно ли, скажем, обеспечить протекание такого процесса:

$$2\,H_2 + 4OH^- \rightarrow 4\,H_2O + 4e^-? \qquad (2)$$

Да, отвечает наука. Для этого надо свести вместе три фазы: газ (водород), источник ионов OH^- (электролит, раствор щелочи в воде) и кусок металла, который и примет образующиеся в реакции электроны. Этот и ему подобные процессы, идущие в месте стыка трех фаз, на так называемой «трехфазной границе», в частности, и изучает электрохимия.

Так получать электроны — громоздко, неуклюже? Возможно. Однако, чтобы получить желаемое — электрический ток, схему надо усложнить еще больше.

Ведь чтобы реакция (2) шла долго, к границе раздела «металл (в электрохимии его называют электродом) — электролит — газ» необходимо непрерывно подводить ионы и отводить электроны. Значит, требуется и второй электрод. Нужна замкнутая цепь. Будем ко второму электроду (специально подобранному) подводить кислород или воздух, чтобы там шла реакция

$$4e^- + O_2 + 2\,H_2O \rightarrow 4\,OH^-. \qquad (3)$$

Очевидно, что в сумме реакции (2) и (3) — это можно легко проверить — дают реакцию (1). Однако в уст-

ройстве, которое осуществил впервые Гров — в водородно-кислородном топливном элементе,— энергия химической реакции преобразуется уже в основном не в тепло, которое трудно использовать, а непосредственно в энергию бегущих по проволоке электронов.

Включенная во внешнюю цепь «газового элемента Грова» лампа горит! Горение в ней поддерживают электроны, выделяющиеся на одном электроде (водородном) и поглощаемые на другом (кислородном).

Но электрохимическое горение замечательно не только тем, что может идти даже при комнатных температурах (холодное горение). Главное его достоинство, столь важное для технических приложений, в другом: это горение идет практически без потерь.

Чтобы сполна оценить эту замечательную особенность топливных элементов, нам необходимо вновь вернуться к горению обычному.

СИЛА СТАЛЬНЫХ МАШИН

УАТТ (1736—1819), английский изобретатель, создатель универсальной паровой машины, родился в Шотландии. Уатт в детстве был очень слабым ребенком, в школу не ходил: чтению и письму его обучила мать. Хроническая мигрень изводила его, поэтому все считали Уатта умственно отсталым. Рано потерял мать и отца (разорившегося купца), в юности путешествовал по Англии, в Лондоне после тяжелых лет ученичества стал механиком. В 1756 году, возвратившись в Шотландию, стал работать механиком в университете в Глазго. Здесь-то и началась его плодотворная работа по совершенствованию паровой машины Ньюкомена. В 1769 году он получил английский патент (№ 013), где были изложены почти все его основные идеи. В 1783 году в поисках эталона мощности занимался исследованием силы лошадей; пришел к выводу, что здоровая лошадь может поднять в среднем 150-фунтовую тяжесть на высоту 4 фута за секунду. Так возникла первая единица мощности — лошадиная сила (в метрической системе именем Уатта названа другая единица мощности — ватт). Примерно в 1800 году в расцвете славы (почетный доктор университета в Глазго, член лондонского Королевского общества) вовсе устранился от дел и жил в Бирмингеме среди основателей знаменитого Лунного общества (к его членам принадлежали Джозеф Пристли, Эразм Дарвин и другие известные англичане).

Примерно полмиллиона лет назад человек сделал свое, быть может, главное открытие — приручил огонь. Это была величайшая революция. Можно смело утверждать: огонь во многом способствовал тому, чтобы человек в конце концов сделался человеком. Отныне практически неограниченные запасы энергии оказались в его руках.

Однако на протяжении многих тысячелетий люди использовали эту энергию крайне неэффективно. Наши далекие предки получили свет и тепло для своих жилищ, у них появилась возможность готовить на огне пищу, ковать оружие, обжигать глиняные горшки, выплавлять стекло — вот, кажется, и все.

Когда говорят об индустриальной революции, о промышленном перевороте, который совершился в XVIII веке, прежде всего упоминают имя Джеймса Уатта и связывают его с созданием паровой машины.

Слов нет, заслуги Уатта велики. Но надо отдавать себе отчет в том, что все его изобретения сводились лишь к усовершенствованию ранее созданного, они — лишь счастливый конец длинной цепочки усилий множества людей. Маркс отмечал, что «критическая история технологии вообще показала бы, как мало какое бы то ни было изобретение XVIII столетия принадлежит тому или иному отдельному лицу».

Еще древние греки делали попытки «запрячь» пар, заставить его трудиться. Затем (в средние века) понадобилось откачивать воду из шахт, которые становились все глубже. Принцип был прост: с помощью ручного насоса создавать вакуум. И вода устремлялась в пустоту. А нельзя ли тут заменить мускульную силу силой пара? Скажем, так. Нагреваем воду в цилиндре. Образующийся пар вытесняет воду, теперь, если охладить сосуд с паром извне (холодной водой), пар превратится, сожмется в несколько капелек воды. Вот и образовался вакуум, куда и устремится вода из затопленной шахты...

Впервые эту идею реализовал английский механик Томас Севери (1650—1715). Однако его насос (патент был получен в 1698 году) не мог поднимать воду на значительную высоту.

(Любопытно, что в 1707 году насос Севери был выписан Петром I и установлен в Летнем саду в Петербурге для подачи воды в фонтан.)

Севери назвал свое устройство «другом шахтера» словно бы в насмешку. Работать с ним было очень опасно: насос часто взрывался и был очень неэффективен.

Вскоре его усовершенствованием занялся другой англичанин (также Томас), кузнец по профессии — Ньюкомен.

Десять лет длилась работа, прежде чем насос стал действовать уже довольно сносно. Ньюкомен уменьшил

давление пара — машина перестала быть такой опасной, как прежде, ввел в цилиндр поршень и заставил давление воздуха толкать его.

И все же главное сделано не было. Создание Ньюкомена еще не превратилось в универсального Работника. Оно могло (да и то не очень ловко) лишь действовать как насос.

Пробил час Уатта.

История изобретения Уаттом паровой машины уже достаточно хорошо и подробно описана другими авторами. Поэтому мы опустим многие детали, не будем вдаваться в технические подробности. Отметим только обстоятельства, при которых было совершено решающее открытие.

Биографы Уатта представляют дело так.

...Зимой 1763 года профессор Андерсон, преподававший физику и астрономию в университете Глазго, начал готовить для демонстрации на одной из своих лекций модель водоотливной машины Ньюкомена. Его ждали огорчения: недавно вроде бы полученная из починки модель вновь оказалась неисправной. Не желая обращаться опять к тем же лондонским мастерам, профессор поручил исправление модели бывшему механику университета Уатту.

Однажды Уатт, занятый своими мыслями, отправился на прогулку. «Это было возле Глазго,— вспоминал он потом.— Был прекрасный день. Я проходил мимо старой прачечной, думая о машине, и подошел к дому Герда, когда мне пришла в голову мысль, что ведь пар — упругое тело и легко устремляется в пустоту. Если установить связь между цилиндром и резервуаром с разреженным воздухом, то пар устремится туда, и цилиндр не надо будет охлаждать. Я не дошел еще до Гофхауза, когда все дело было уже покончено в моем уме!»

Конечно, тысячи людей прогуливались мимо старых прачечных и видели клубы пара, вырывавшиеся из окон. Но только Уатта, усиленно думавшего над тем, что его тогда занимало, вид прачечной навел на мысль о конденсаторе, помог ему найти выход из безвыходного, казалось бы, положения...

Вот такие сугубо личные наблюдения и мысли Уатта, вроде бы по вопросам частного характера, привели в итоге к созданию «универсального двигателя крупной промышленности» (Маркс).

И вскоре по земной тверди (вначале паровые установки «впрягали» в кареты вместо лошадей!) забегали паровозы англичанина Джорджа Стефенсона (1781—1848), американский изобретатель Роберт Фултон (1765—1815) строит первый, еще колесный, пароход «Клермонт».

К 1826 году в одной Англии насчитывалось уже до 1500 паровых машин с общей мощностью около 80 тысяч лошадиных сил. За редкими исключениями это были машины уаттовского типа.

Начался быстрый переход от основанных на ручном труде мануфактур к крупной машинной индустрии. Время как бы обновилось, и все потому, что силу мускулов теперь заменила сила стальных машин.

ФОРМУЛА КАРНО

КАРНО (1796—1832), французский физик, сын Лазара Карно (математика, крупного государственного и военного деятеля эпохи французской революции и времен Наполеона I). Шестнадцати лет Карно поступил в Политехническую школу, кончил ее через два года и получил назначение в инженерные войска. С большим рвением занимался он делами, далекими от военного: математикой, физикой, химией, биологией, политэкономией, музыкой. Видимо, поэтому в 1828 году Карно оставил военную службу. За всю свою жизнь (недолгую, правда) опубликовал лишь одно, но гениальное произведение: «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824). Это был, по существу, пролог новой важной науки — термодинамики (хотя Карно ошибочно рассматривал теплоту как некую невесомую жидкость — теплород). Можно только гадать, как много мог бы дать науке гений Карно, ибо ученый скончался в возрасте 36 лет во время эпидемии холеры.

И на Солнце, говорят, есть пятна...

Первые паровые машины были крайне несовершенны. Во время Карно их коэффициент полезного действия (кпд — та часть энергии, выделяющейся при сжигании топлива, которая реально могла пойти в дело, на совершение полезной работы,— составлял от 5 до 7 процентов. Это значило, что от 93 до 95 процентов энергии тратилось впустую.

Отчего так мал кпд тепловой машины? Можно ли его повысить? Где лежат пределы максимальной производительности железных помощников человека?

Все эти вопросы волновали военного инженера, сотрудника генерального штаба Франции Никола Леонарда

Сади Карно. И он в своей книге дал на них точный и однозначный ответ.

Суть единственной работы Карно его потомки ухитрились ужать, уложить в одну-единственную формулу. Вот она:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

где η_t — максимальный коэффициент полезного действия (теоретический, идеальный, выше этой величины уже невозможно подняться) паровой, тепловой машины, а T_1 и T_2 — максимальная и минимальная температура в ней — температура самой горячей ее точки (пар, нагретый газ) и самой холодной, соответственно на входе в машину и на выходе из нее.

Карно, несомненно, был одним из первых физиков-теоретиков. Он ставил вопрос в самой общей форме: «О получении движения из тепла». При анализе работы паровой машины он не учитывал никаких специфических свойств рабочего тела (пара) и самой паровой машины. Поэтому и выводы его универсальны: их можно распространить на любой тип тепловой машины — дизельного двигателя, турбины...

Любой агрегат, где тепловая энергия превращается в механическую (к примеру, в движение поршня при расширении нагретых газов), должен подчиняться ограничениям Карно.

А теперь поиграем с цифрами. Взглянем на формулу Карно. В ней температуры T_1 и T_2 должны быть взяты в градусах Кельвина. (Напомним, что температура таяния льда — ноль градусов по Цельсию — есть плюс 273 градуса по Кельвину, а абсолютный ноль по Кельвину есть минус 273 градуса по Цельсию.)

Итак, глядя на формулу, мы видим, что все тепло удалось бы превратить в работу, если бы можно было получать на выходе из машины продукты, охлажденные до абсолютного нуля, то есть иметь $T_2 = 0$.

Но это невозможно. Минимум температуры задается окружающей нас средой: это, скажем, 20 градусов по Цельсию, или 293 по Кельвину. И получается непререкаемый вывод: принципиально нельзя построить тепловую машину, в которой все тепло превращалось бы в работу.

Что же остается? Формула Карно говорит: ради увеличения кпд следует по возможности поднимать значе-

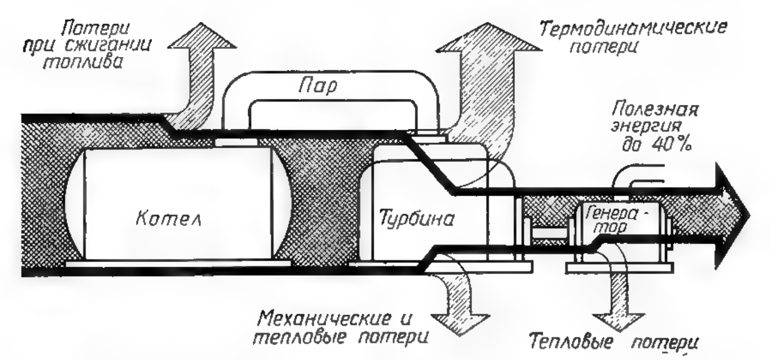


Схема тепловой электростанции, дающей на выходе всего лишь до 40 процентов полезной энергии

ние T_1. Ведь при неограниченном увеличении T_1 кпд машин, очевидно, будет стремиться к 100 процентам! Но и тут нас ждет разочарование.

В современных паротурбинных блоках тепловых и атомных электростанций температура водяного пара не превышает 540 градусов Цельсия, или 813 градусов Кельвина. Так что идеальный кпд для этих установок есть (813—293)/813 = 0,64 (64 процента).

Но 64 процента — это оценка сверху! Реальные цифры оказываются значительно меньшими. Их можно получить уже не по циклу Карно, а из цикла Ранкина *.

Для современных поршневых паровых машин и двигателей внутреннего сгорания реальный кпд в среднем не превышает 30 процентов, а для более совершенных устройств — паровых и газовых турбин — 40 процентов.

Куда теряется 60—70 процентов первоначально извлеченных (скрытых в топливе) запасов энергии? О, тут масса лазеек! Практически невозможно добиться полного сгорания топлива, достичь полного охлаждения горячих газов, а значит, избежать потерь тепла через трубу электростанции. Часть энергии уходит на трение и необратимый переход тепла. И так далее.

Следует подчеркнуть, что цифры эти вряд ли изменятся в будущем. За два века изобретатели и инженеры «выжали» из тепловых машин все — их кпд достиг предела.

---

* Ранкин Уильям Джон Макуори (1820—1872), шотландский инженер и физик, создатель технической термодинамики.

Вот почему с таким энтузиазмом были, например, приняты работы по созданию МГД-генераторов. Ведь в них поток горячей плазмы нагрет до 2500—3000 градусов Цельсия. Температура T_1 в формуле Карно резко возрастает. Но опять неувязка! Одновременно в этих устройствах растет и температура T_2: плазма на выходе из магнитогидродинамического генератора все еще остается очень горячей (те же тысячи градусов). Поэтому МГД-генераторы могут эффективно работать лишь в сочетании с обычной паротурбинной установкой. И суммарный выигрыш в кпд оказывается не таким уж великим. Удается достичь лишь 50 процентов. (Со временем исследователи, работающие над усовершенствованием МГД-установок, надеются получить показатели повыше: до 60 процентов.)

Однако будем справедливы: и этот вроде бы небольшой привесок в 10 процентов (от 40 до 50) в масштабе, скажем, такой страны, как наша, даст колоссальный прирост энергии. Если бы все ГРЭС СССР удалось перевести на МГД-метод, была бы достигнута громадная экономия топлива.

ПОСУЛЫ НЕРНСТА

НЕРНСТ (1864—1941), немецкий физик и физикохимик (почетный член Академии наук СССР, 1927). Сын судьи, родился в Восточной Пруссии (примерно там же, где и Коперник). Учился в университетах Цюриха, Берлина, Граца и Вюрцбурга, в последнем в 1887 году получил свою summa cum laude — докторскую степень. В 1896 году основал при Геттингенском университете физико-химический институт, после переезда в Берлин — директор Института химии (1905—1922), затем — Института физики (1924—1933). Наиболее важное открытие Нернста — формулировка третьего закона термодинамики (1906), или принципа, который был затем назван именем Нернста. Суть принципа: достичь абсолютного нуля температур невозможно. Набравшись бесконечного терпения, вооружившись самым совершенным оборудованием, проявив сверхизобретательность, потратив массу средств, можно добраться до температур, отличающихся от абсолютного нуля лишь на миллионные доли градуса, однако дотронуться до истинного температурного дна невозможно! Эти работы были в 1920 году увенчаны Нобелевской премией по химии. Нернст известен также как изобретатель, например, он сконструировал электрическое фортепьяно. Однако главное достижение Нернста-изобретателя — его лампа накаливания (1900). В ней нить была из тугоплавкой магнезии: она начинала действовать только после предварительного разогрева (стоило лишь подержать около нити зажженную спичку, и она начинала ярко светиться). Лампа Нернста (ее зажигание длилось 30—45 секунд), как и свеча Яблочкова, была вытеснена лампой Эдисона: однако в этой борьбе «моральная» победа осталась за

Нернстом. Эдисон твердо верил, что все профессора — непрактичные мечтатели; и вот, к его великому изумлению, профессор Нернст, продав патент своей лампы, получил за него миллион марок! (Нернст вообще проповедовал изобретательское отношение к научным занятиям, по его мнению, Рентгену следовало бы запатентовать свои знаменитые Х-лучи, с тем чтобы позднее превратить открытие в деньги, чего Рентген, конечно же, не сделал.)

Вот и приспело нам время вернуться к судьбе топливных элементов. Теперь мы уже в состоянии оценить это новшество. А поможет нам в этом Вальтер Фридрих Герман Нернст. Поможет своими научными трудами.

Вскоре после окончания университетского образования физик Нернст знакомится с физикохимиком Сванте Аррениусом, тогда уже (хоть был всего лишь на пять лет старше Нернста) доктором наук и автором нашумевшей теории электролитической диссоциации.

Смелые идеи шведа увлекли Нернста, и он решил оставить «чистую» физику ради пышно расцветавшей тогда новой науки — физической химии. «Счастливые новые мысли,— писал позднее Нернст,— всегда действуют плодотворно: ведь следствием их является стремление к творчеству».

В 1887 году в Лейпциге по рекомендации Аррениуса Нернст становится ассистентом Оствальда — идейного вождя физикохимиков тех времен. И все же Нернст остался физиком. Первое, что он сделал,— приложил принципы термодинамики (науки физической) к гальваническим элементам — тем самым электрохимическим источникам тока, в семью которых входит и топливный элемент. И добился здесь большого успеха.

Впервые со времен Вольты, который изобрел гальванический элемент примерно столетие назад, нашелся человек, способный дать разумное истолкование возникавшей в этом источнике тока разности потенциалов. В 1893 году Нернст вывел теоретически уравнение (оно носит его имя), определяющее величину электродвижущей силы (E) электрохимического элемента. Вот эта формула:

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2}.$$

Внешне она кажется простой, так же как и формула Карно. Однако простота эта обманчива.

Та пора науки, когда еще можно было открывать в природе самые простые связи-закономерности, заканчи-

валась. Ом, вольт, ампер — все это отголоски тех более ранних времен.

Прежде отделенные одна от другой науки начали взаимно переплетаться (физическая химия), диффундировать, проникать друг в друга. И может быть, как раз этой тоской по утраченной чистоте научных взглядов и понятий, их целостности, ясным пониманием грядущей сложности — всем этим и обусловлена большая язвительность Нернста, проявлявшаяся, например, в его неодобрительном отношении к новым терминам.

Рассказывают, что, когда в науке была введена новая единица частоты — герц, Нернст иронически заметил:

— Я тоже предлагаю новую единицу. Она будет означать скорость перехода жидкости из сосуда в сосуд — один литр за одну секунду. Я назвал бы эту единицу «фальстаф»: если верить Шекспиру, этот персонаж был великий мастер по части вливания в себя доброго английского эля...

Мы не будем обсуждать формулу Нернста. Нам важно другое: те выводы, которые ученый из нее сделал. Он численно рассчитал количество электрической энергии, которое получается при электрохимическом соединении угля с кислородом.

Результат был ошеломляющим. Нернст показал, что если бы удалось превратить химическую энергию угля в электричество электрохимическим путем (читай, в топливных элементах), то максимальный теоретический кпд такого процесса составил бы 99,75 процента.

Почти сто процентов. Вот оно — первое из многих достоинств топливных элементов! Они, оказывается, не подчиняются ограничению Карно. В них в отличие от паровой и прочих тепловых машин энергия вроде бы практически не теряется.

К разговору о кпд топливных элементов стоит прибавить еще несколько подробностей. Как следует из термодинамики, для топливных элементов

$$\text{кпд} = 1 - T\left(\frac{\Delta S}{\Delta H}\right);$$

здесь T — температура окружающей среды, а ΔS и ΔH — приращения соответственно энтропии и энтальпии, термодинамических характеристик системы. Для реакций с выделением энергии ΔH отрицательно, а ΔS (мера не-

упорядоченности состояния молекул вещества) бывает и больше и меньше нуля. Поэтому у топливных элементов кпд может даже в некоторых случаях превышать (?!) единицу.

Приведем примеры. Кпд процесса сгорания угля ($C + O_2 = CO_2$) близок к единице: количество молекул газа (эта фаза отвечает максимально неупорядоченному состоянию материи) в ходе реакции не изменилось, поэтому можно считать, что практически $\triangle S = 0$, и тогда кпд = 1 (это и показал в свое время Нернст).

Напротив, при неполном сгорании угля ($2C + O_2 = 2CO$) число молей газа в результате реакции возрастает ($\triangle S$ больше нуля), и поэтому кпд будет больше 1; так, при $T = 1200$ K кпд равен 200 процентам.

Никаких чудес в этом нет: тут топливный элемент работал бы по принципу теплового насоса, преобразуя в электроэнергию тепло, поступающее из окружающей среды.

Таким образом, в топливных элементах заложены не только возможности высокоэффективного метода преобразования энергии, но и пути поглощения избыточного тепла из окружающей среды. А это очень важно в экологическом плане, поскольку позволяет бороться с тепловыми загрязнениями биосферы.

ПРОРОЧЕСТВО ОСТВАЛЬДА

ОСТВАЛЬД (1853—1932), немецкий физикохимик и философ-идеалист. Родился в Риге. Родители — потомки выходцев из Германии (отец — учитель, затем владелец бондарной мастерской, мать — дочь пекаря). В школе учился плохо: на пятилетний курс обучения ушло семь лет, подвижный, увлекающийся мальчик постоянно был в разладе со школьной рутиной. Окончил (1875) Дерптский (Тартуский) университет, профессор Рижского (до 1887), потом Лейпцигского университетов. После переезда в Германию Оствальд быстро становится главой громадной, созданной им самим школы физикохимиков. В 1887 году основал «Журнал физической химии», ставший рупором новых идей («Такой журнал был необходим,— писал Оствальд,— ибо вряд ли какие-нибудь из прежних повременных изданий решились бы у себя печатать подробного рода «ереси»). Когда Оствальд умер, его быстро и дружно забыли (сейчас им интересуются в основном лишь историки науки), а ведь когда-то он был притчей во языцех, гремел, громыхал на весь мир; словно вулкан, непрерывно извергал новые идеи, создавал научные общества и журналы, писал учебники, книги по философии, трактаты о цветах и красках... В своей творческой работе Оствальд любил прибегать к своеобразному умственному «севообороту», переключаясь — при полном энтузиазме и увлеченности, при полнейшей отдаче душевных и умственных

сил — с одного дела на другое. Поэтому мы знаем Оствальда-ученого (Нобелевская премия по химии в 1909 году за исследования по катализу), Оствальда-педагога (к 50 годам им было уже написано около 6000 страниц учебников, справочников и других подобного рода книг, 300 научных статей, около 4000 рефератов и 9000 рецензий на книги, его учебники по физической химии — «большой Оствальд» и «малый Оствальд» — пользовались в свое время широкой популярностью и служили образцом для подражания). Знаем Оствальда-философа — главным образом по попытке ниспровергнуть материализм и заменить его идеалистической концепцией «энергетизма», а также по длительной борьбе с атомной теорией строения вещества, закончившейся тем, что он вынужден был признать свое поражение; «энергетизм» Оствальда подвергся резкой критике в знаменитой работе В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм», против него выступили многие естествоиспытатели, включая друзей и учеников Оствальда, в частности Нернст; сам Оствальд, всю жизнь бывший воинствующим атеистом, грустно признавался, что скоро он, видимо, получит от церковников звание доктора теологии. Мы знаем Оствальда как великолепного популяризатора науки — положил начало изданию серии «Классики точных наук» («Ostwald's klassiker der exakten Wissenschaften»), Оствальда как организатора науки — любопытны тут опубликованные в 1901 году воспоминания русского химика Н. А. Шилова, в свое время работавшего у Оствальда в Германии: «...его роль в настоящее время в полном смысле каталитическая: сам почти не работает, не входит в дела лаборатории, читает малоинтересный курс «Натурфилософии» — нечто вроде философии в жилетном кармане. Посылает ежедневно в лабораторию корзину бутербродов и букет роз и этим на поверхностный взгляд ограничивает свое участие в жизни института; но зато он несомненно служит катализатором — большинство мыслей ассистентов и докторантов возбуждается его советами или тем кратким критическим резюме, которым он сопровождает отчеты о лабораторных работах на Besprechung'ах, происходящих каждую неделю; при этом он сохранил, несмотря на генеральство, полную доступность и по-прежнему умеет быстро схватывать чужую мысль и в двух словах выразить свою...» 20-летняя непрерывная кипучая деятельность ученого и педагога, организатора и пропагандиста науки подорвала силы Оствальда, профессорские обязанности стали тяготить его. («Если мы вникнем в то, что приходится изо дня в день быть в курсе нескольких дюжих научных работ молодых людей, считающих за нечто само собой разумеющееся, что профессору совершенно точно известно, где они в данный момент находятся, то мы поймем, какое истощение должно повлечь за собой это повседневное напряжение умственного глаза на постоянно меняющиеся области...» — жаловался Оствальд в письме.) Отвращение к лаборатории («самая жестокая болезнь, какой может заболеть профессор») пугает его. («Наука требует своих жертв, — пишет он с горечью, — с такой же неумолимостью, как смерть. Большей частью эта жертва приносится ей в молодости, и счастлив тот, кто тогда же умирает, как Галуа, Абель и Г. Герц; его имя остается окруженным сияющим ореолом, он боролся и прошел прекрасные, героические годы молодости, а годы инвалидности миновали его...») В 1906 году он подает в отставку и основную часть времени начинает проводить в Гроссботене на своей даче «Энергия» — в большом особняке, расположенном в красивом парке. Теперь это музей Оствальда.

Сидеть на даче и проводить небольшие опыты? (Оствальд соорудил у себя четыре лаборатории-комнаты, окна которых выходили на четыре стороны света: он сделал это специально, так как хотел работать в помещении, где столько света, сколько ему нужно было для работы; иногда он работал в солнечной лаборатории, иногда в темной...) Тихо музицировать в кругу своей многочисленной семьи? Писать картины маслом в живописных уголках Гроссботена? Нет, не таков был Оствальд — борец, задира, привыкший быть связанным (хотя бы незримыми нитями!) с большим числом людей: среди них были и соратники и противники, с которыми он много раз «скрещивал свою шпагу».

Освободившись от тягот профессорства, Оствальд с увлечением занялся («я с головой сижу в чернильнице»,— признавался он друзьям) литературной работой. Он понимал, что приспела пора разобраться в сложном хозяйстве самой науки, многоликий организм которой интенсивно развивался. (Мы бы сказали сейчас, что Оствальд занялся науковедением.)

В 1909 году Оствальд выпустил книгу «Великие люди», в которой проанализировал жизненный путь шести крупных ученых: химиков Дэви, Либиха, Жерара и физиков Фарадея, Майера, Гельмгольца. Сделал он это по заказу японского правительства, пожелавшего узнать, как растить ученых-гениев.

Иван Петрович Павлов, наш великий физиолог, как известно, делил людей на две категории — мыслителей и художников. Одни более склонны к наукам, другие к искусству. Сейчас уже, во всяком случае в науке, градация типов значительно расширилась: говорят об ученых-эрудитах, ученых-администраторах, ученых-творцах... Оствальд же подразделял ученых на классиков и романтиков. В свое время эта классификация была очень популярна в научных кругах.

Классик — это основательный, медлительный, предпочитающий индивидуальный стиль работы исследователь, глубоко изучающий какой-нибудь один предмет, научную проблему.

Романтик же — быстро реагирующий, рано созревший, нуждающийся в большой аудитории, в многочисленных сотрудниках, которые бы воспринимали исходящие от него импульсы. Романтик работает быстро и быстро переходит от одной проблемы к другой («пашет

вширь, а не вглубь»!). Именно романтики, по мнению Оствальда, создают научные школы.

Романтиком был и сам Оствальд. Во все свои дела он вносил неукротимый дух бойца: выступал — вместе с Аррениусом и Вант-Гоффом — за утверждение новинок физической химии, за создание и распространение международного языка, за рациональную организацию умственного труда...

Большую роль сыграл Оствальд и в судьбе топливного элемента.

«Чтобы оказывать влияние на широкие круги, новая научная истина нуждается в резонаторе; она должна появиться в соответствующее время и быть выражена в понятной форме»,— писал тогда Оствальд.

Оствальд сразу же понял, какие большие возможности для энергетики сулят топливные элементы. И не таков он был, чтобы отмалчиваться, когда одно из детищ его любимой науки (электрохимия до сих пор считается частью физической химии) может на голову превзойти по эффективности паровые машины — этих основных поставщиков энергии для человека.

Топливные элементы — лишь новинка, беспомощный зародыш? Пусть! Мир держится на силе пара? Ну и что же! Тем почетнее будет конечная победа.

Одно дело, когда о неоспоримых достоинствах топливных элементов в своем учебнике «Теоретическая химия» написал молодой, еще мало кому известный Нернст, и совсем другое, если пропагандой топливных элементов занялся Вильгельм Фридрих Оствальд, всемирно известный ученый, организатор и первый президент только что созданного в Касселе Немецкого электрохимического общества.

В 1894 году на одном из первых собраний этого общества Оствальд произносит речь во славу топливных элементов. Она была затем опубликована в первом номере тоже только что основанного «Электрохимического журнала». Оствальд писал: «Я не знаю, достаточно ли ясно представляют себе, сколь несовершенен для нашего времени высокоразвитой техники важнейший источник энергии, которым мы сейчас пользуемся,— паровая машина...»

Да, в то время еще господствовали пар и уголь (не нефть!); на тепловых электростанциях кпд преобразования энергии достигал только 10 процентов.

И далее Оствальд писал:

«...Путь, которым можно решить самый важный из всех технических вопросов — вопрос получения дешевой энергии, должен быть теперь найден электрохимией. Если мы будем иметь элемент, производящий электроэнергию непосредственно из угля и кислорода воздуха в количестве, более или менее соответствующем теоретическому, то это будет техническим переворотом, превосходящим по своему значению изобретение паровой машины... Как будет устроен такой гальванический элемент, в настоящее время можно только предполагать... В таком элементе происходили бы те же самые химические процессы, что и в обычной печи: с одной стороны засыпался бы уголь, с другой — подавался кислород, а удалялся бы продукт их взаимодействия — углекислота... Однако здесь не место обсуждать возможные технические подробности, которые могли бы привести к цели, так как, прежде чем серьезно возьмутся за выполнение этой задачи, пройдет еще некоторое время. Но с тем, что здесь не идет речь о лишенной практического смысла идее ученого, я думаю, можно наверняка согласиться. Ведь практически мы имеем дело со случаем, когда, подобно какой-либо механической задаче, можно предсказать полный успех и техника должна только в наиболее дешевой и лучшей форме разрешить эту проблему...»

Так почти столетие назад Оствальд предсказал топливным элементам великое будущее.

МНИМЫЕ УДАЧИ

Многие изобретатели (и до пророчества Оствальда, и после него), пытаясь создать приемлемый для практического применения вариант топливного элемента, отдали этому делу годы своей жизни.

В 1897 году Жако разработал электрическую батарею мощностью в 1,5 киловатта, которую поспешили объявить решением проблемы топливного элемента. Устройство было таким: железный и угольный стерженьки (электроды) погружали в электролит — расплавленную (температура 400—500 градусов Цельсия) едкую щелочь ($NaOH$).

Жако предполагал, что в соответствии с рекомендациями Оствальда в его элементе уголь сжигается в кислороде воздуха. Однако последующие более тщательные

Отдельные детали углерод-воздушного топливного элемента Жако: слева — воздушный катод в форме железного сосуда, в центре — анод (углеродный стержень), справа — фиксатор анода



исследования установили: фактически здесь в скрытом виде реализовались те же процессы, что и в элементе Грова.

Характеристики элемента Жако были прекрасны: кпд 82 процента, плотность тока 100 миллиампер с каждого квадратного сантиметра поверхности электродов. Этого было достаточно, чтобы демонстрировать техническую реализуемость и экономичность топливного элемента.

Работа Жако наделала много шума. Изобретатель строит установку, в ней последовательно включенные топливные элементы приводили в действие мотор.

В том же году Жако публикует в журнале «Harper's Magazine» сенсационную статью о своих работах. Там он детально описал проект океанского лайнера с энергоустановкой из топливных элементов.

Автор скрупулезно высчитывает выгоды такого предприятия. Насколько меньше угля потребовалось бы взять на борт такого корабля, если бы простое обычное горение топлива заменило горение электрохимическое...

Однако этим проектам не суждено было осуществиться. Установка Жако проработала с перерывами лишь около полугода.

Этот поначалу успешный опыт был заранее обречен на неудачу: при столь высоких температурах происходило быстрое окисление угольного стерженька, получающаяся при этом углекислота карбонизировала электролит (щелочь $NaOH$ превращалась в соль Na_2CO_3),

делала его непригодным для нормального функционирования элемента...

ЯБЛОЧКОВ (1847—1894), русский изобретатель, сын мелкопоместного дворянина, родился под Саратовом. «Муза изобретательства» — очень взбалмошная особа — вольно распоряжалась судьбой Яблочкова: жизнь его была коротка (46 лет), но обильна событиями. Окончил Николаевское инженерное училище (1868), где получил образование военного инженера; затем работа в техническом гальваническом заведении в Петербурге, служба в саперном батальоне в Киевской крепости. Тяга к изобретательству заставила его в возрасте 24 лет выйти в отставку. И вот он уже в Москве, начальник телеграфа Московско-Курской железной дороги (1873). Удачно поместил на паровозе царского поезда, направлявшегося из Петербурга в Крым, электрическую дугу В. В. Петрова (однако начальнику телеграфа самому пришлось на морозе целыми ночами напролет следить за исправностью лампы и таким образом убедиться в несовершенстве даже самых лучших устройств, регулировавших в то время непрерывную работу дуги). Основательно изобретательством Яблочков занялся, когда стал совладельцем мастерской физических приборов. Кульминация его жизни — создание электрической свечи, не нуждавшейся в регуляторе (1875). Яблочков уезжает в Париж, где получает французский патент № 112024 (1876) на это изобретение. Оно имеет необычный успех: улицы Парижа осветил «русский свет» (1877), потом триумф на Всемирной выставке (1878), множество компаний было создано — во Франции, Англии, США — для коммерческой эксплуатации системы освещения Яблочкова, в 1881 году он награждается орденом Почетного легиона. Изобретатель еще молод, но уже знаменит, богат — и вдруг все рухнуло. В том же 1881 году на Электротехнической выставке (все в том же Париже) Эдисон впервые демонстрирует свою долговечную лампу накаливания с угольной нитью. Звезда Яблочкова закатилась: он возвращается в Россию; начали сказываться годы неустанного труда над многочисленными изобретениями, которые, как и знаменитая «свеча Яблочкова», не только прославили его имя, но и отняли здоровье. Последний год жизни он проводит в родном Саратове, где рос и гимназистом конструировал то счетчики для измерения пройденного повозкой пути, то землемерные инструменты, которыми крестьяне в имении его отца пользовались еще долгие годы. Жил в Центральной гостинице; свой стол, за которым проводил многие часы, он превратил в лабораторию и мастерскую, никакие уговоры жены и друзей прервать работу не помогали: Яблочков спешил, чувствуя, что больное сердце оставило ему мало дней. На улице его вообще редко можно было встретить: он не любил гулять; его очень большой рост (2 аршина 14 вершков, рост Петра I) всегда привлекал внимание прохожих. По желанию Яблочкова тело его погребено в родовом склепе в ограде церкви села Сапожок под Саратовом, примерно там же, где он родился.

Среди тех, кто пытался вдохнуть жизнь в топливный элемент, был и наш выдающийся соотечественник Павел Николаевич Яблочков. Он понимал, что лампа Эдисона нанесла его некогда счастливому детищу смертельный

удар. Еще два-три года, и оно перестанет применяться. Заниматься усовершенствованием своей свечи? Мало толку! И Яблочков, чтобы не расставаться с милой его (уже тогда — больному) сердцу электротехникой, принимает неожиданное решение. Раз проблема источника света решена (лампа Эдисона), следует переключиться на другую не менее важную задачу — на поиск хороших генераторов электрической энергии. И тут (Яблочков был образованнейший инженер) могли пойти в ход топливные элементы. В 80-х годах Яблочков создает и патентует несколько конструкций водородно-кислородных (по типу изобретения Грова) топливных элементов.

Все эти патенты, однако, не нашли применения на практике. Не принесли изобретателю ни дохода, ни славы.

Усилия Яблочкова по созданию сносных топливных элементов и условия, в которых эта работа велась, очень типичны: лишь одиночки-изобретатели продолжали спустя полвека дело Грова.

Яблочков поставил перед собой задачу, требующую деятельности целого коллектива, планомерных и долгих усилий. А он трудился один в своей совершенно не приспособленной для этих работ квартире. Часть его опытов была связана с применением чрезвычайно реакционноспособного натрия. Во время одного из экспериментов произошел взрыв. Жена Яблочкова вспоминала позднее: «Окна были выбиты, вся комната наполнилась газом, ничего не стало видно и слышно. Яблочков не подавал голоса, когда его звали. Газы выходили через выбитые окна в большом количестве, и публика на улице решила, что в доме пожар. Был дан пожарный сигнал, и вот, когда приехали пожарные,— наступила страшная минута. Я выбежала на улицу, умоляя пожарных не заливать комнаты водой, иначе произошел бы новый взрыв, который мог бы разрушить весь дом. Хозяин дома, тоже инженер, также выбежал на улицу и, к счастью, сумел убедить пожарных не заливать пожар. У нас был запас песку — две бочки, и все стали засыпать все песком. Когда все стихло, я увидела Павла Николаевича в углу лаборатории, почти задохнувшегося, с обожженной бородой...»

И все же изобретатели не сдавались. В то время у топливного элемента, казалось, были реальные шансы

занять свое почетное место в энергетике. Ведь в отличие от паровой машины они могли генерировать электрический ток!

УПУЩЕННЫЙ ШАНС

Электроэнергия... Мы настолько привыкли к ее повседневной помощи, что даже, оставшись без электричества всего на несколько часов, не задумываемся о его роли в нашей жизни.

А ведь, разыскивая перегоревшую пробку при тусклом свете бог весть откуда взявшейся свечки, нам бы стоило поразмыслить о многом: о том, к примеру, что электрический ток — наиболее удобный вид энергии, который очень просто передавать на большие расстояния, который легко превращается в свет, тепло, механическую работу...

Полезно было бы также мысленно представить себе ту обстановку, когда Его Величество Пар, грубо работая локтями, всюду прокладывал себе дорогу.

Попробуем вообразить картину типичной фабрики тех времен.

В каком-нибудь углу фабричного здания мы увидели бы непременно паровую машину. Она добывает из каменного угля — он лежит тут же громадной черной грудой — энергию, приводящую в движение все механизмы нашей воображаемой фабрики. И вот тут бы мы заметили странные вещи. От этой главной паровой машины по всем направлениям расходится бесчисленная сеть всевозможных передаточных валов и ремней, переносящих добытую энергию во все стороны.

Посмотрите какая путаница ремней! Послушайте, что за шум! Какие громадные потери энергии при этом неудобном способе переноса! Вряд ли из всей и без того куцей энергии, добываемой паровой машиной, до места доходило более 50 процентов...

Валы, ремни, шкивы, зубчатые колеса, всякие там шестеренки — все это оказалось ненужным с приходом электричества.

По самой своей природе паровая машина была удобна лишь для широкомасштабного производства энергии. Здесь трудно добывать энергию маленькими порциями или прерывистым путем, так сказать, после нажатия кнопки.

Крошечные паровые машины, в которых, по требованию, огонь в печи гас бы и вновь возобновлялся,— это конечно абсурд. Но те же самые поколения, которые наблюдали победное шествие паровых машин, были свидетелями решающих открытий, приведших к тому, что теперь энергию можно было «фасовать» в любых порциях, больших и малых, и транспортировать в любое место. Этой удобной формой энергии было, конечно же, электричество.

Но как его получать? Получать в широких масштабах?

В те дни, когда энергетика, основанная на энергии расширяющегося пара, только набирала силу, электрический ток людям уже давали (правда, в количествах, которые наш век счел бы смехотворными) гальванические элементы. А значит, могло найтись большое дело и для их электрохимической «родни» — топливных элементов. То был для них хороший шанс.

Вопрос стоял остро. Шла конкурентная борьба между различными возможными способами получения столь желанного электричества.

Конечно же, источником энергии (тут мнения тогда не расходились) должен был быть дешевый уголь. Но извлекать из него химическую энергию можно было различными приемами.

Первый путь — о нем мы уже много говорили — это топливные элементы.

Но был и второй путь, в отличие от первого окольный, многоступенчатый (он успешно практикуется и до сего дня). Это путь прямого сжигания топлива, то, что сейчас называется тепловой станцией.

Тепловые станции возникли не в один день. Эта длинная цепочка процессов: сожгли уголь — нагретый пар приводит в действие лопасти паровой турбины (или толкает поршень паровой машины), а уж ее механическая энергия в свою очередь побуждает к работе электрический генератор.

Вот этой-то последней стадии лет этак сто назад не было и в помине. И здесь-то для топливных элементов и был тот самый шанс, о котором мы упоминали выше.

Но времена менялись. Еще в 30-х годах прошлого века Фарадей показал, как можно вырабатывать электричество при помощи механического движения проводника, пересекающего силовые линии магнитного поля. В таком электрическом генераторе, или динамо, кине-

тическая энергия движения превращалась в электрическую. И это могло стать хорошим дополнением к паровой машине.

Дело стало за достаточно мощным магнитом, ибо чем интенсивнее силовые линии магнитного поля, тем больше возникающий в проводнике ток. И эта техническая задача была вскоре решена.

Дальнейшие события не заставили себя долго ждать. В 1872 году немецкий электротехник Фридрих фон Хефнер-Альтенек (1845—1904), ведущий конструктор и главный инженер фирмы «Сименс и Гальске», сконструировал первый эффективно действующий генератор постоянного тока.

Теперь можно было дешево и в изобилии производить электричество, не только сжигая, скажем, уголь или другое подходящее топливо, но и используя энергию падающей (гидроэлектростанции) воды.

То был для сторонников, поборников электрохимического способа получения энергии (и для топливных элементов, делающих лишь первые робкие шаги) сокрушительный удар. Вскоре за ним последовал другой, не менее внушительный.

Нанесли его топливному элементу двигатели внутреннего сгорания.

Если бы на рубеже XX века двигатели внутреннего сгорания развивались бы не столь стремительно, как это было в действительности, возможно, уже давно бы по дорогам планеты бегали бесшумные, экономичные, не загрязняющие атмосферу электромобили, получающие энергию от топливных элементов.

Однако вышло не так: замечательные достижения в конструировании двигателей внутреннего сгорания, их бурное, стремительное развитие и рост новой техники, основанной на их применении, решили тогда спор не в пользу топливного элемента.

Сложная проблема топливных элементов, естественно, не вызывала особого энтузиазма. Вопрос был временно похоронен.

ФИЛОСОФСКИЙ КАМЕНЬ ЭЛЕКТРОХИМИИ

Великие изобретатели давно прославлены. Биографы утверждают, что для Эдисона самой трудной задачей было изобретение аккумулятора. Он перепробовал более

двух тысяч электродных пар, прежде чем наткнулся на известную всем ныне железо-никелевую систему.

То — великие!.. А кто считал труды Неизвестного Изобретателя? Сколько их, безымянных, своей незаметной жизнью готовивших грядущие технические «урожаи», давших толчок не одной плодотворной мысли следующих поколений более удачливых изобретателей и более, наконец, талантливых?..

Динамо-машина торжествовала. Неоспоримые преимущества нового способа позволили в широких масштабах начать быстрое внедрение электроэнергии в промышленность и быт. Усилия ученых и инженеров были всецело направлены именно сюда.

Топливными же элементами продолжали заниматься только «чудаки». Для электрохимиков эти устройства и вообще превратились в нечто вроде пугала — столько усилий и такие скромные плоды.

Но так, исподволь, трудами многих скромных подвижников идеи топливного элемента, ее рядовых солдат, незаметно, по кирпичику закладывался фундамент последующих успехов.

Типична фигура швейцарского исследователя Эмиля Баура, отдавшего проблеме топливного элемента 40 лет своей жизни.

Не удалось отыскать в справочниках и энциклопедиях даже дат его жизни, каких-то подробностей о нем самом. Только ссылки на его в общем-то довольно скромные работы. Так, например, известен сконструированный еще в 1911 году топливный элемент Баура—Эренберга. Это устройство для электрохимического сжигания угля имело неплохие характеристики (кпд 90 процентов). Считается лучшим высокотемпературным элементом и до сих пор. Однако практического применения он снова — в который раз! — не нашел.

В 1933 году Баур публикует пространнейший обзор, где подводит итоги работам многих поколений исследователей. Отсчет идет от Гемфри Дэви, которого, видимо, поэтому многие считают крестным отцом топливного элемента — в 1802 году он якобы создал первый образец

Работа Баура и до сих пор остается наиболее полной исторической сводкой сведений о топливных элементах. Баур понимал стоящие перед ним трудности. Он писал: «Как свинцовый, так и железо- (или кадмиево-) никелевый аккумулятор потребовали долгих лет для сво-

его оформления. Поэтому нельзя ожидать, что для создания топливных элементов потребуются незначительные усилия...»

И все же (слаб человек!) к концу жизни Баур приходит к пессимистическим выводам. Отдав делу десятки лет труда, он заявляет публично: использовать топливные элементы невозможно. Это горькое признание — естественное следствие объективных трудностей, мешающих реализации перспективной идеи топливных элементов.

Примечательно и другое: есть тут и некоторая вина самого Оствальда. Он ведь ратовал за топливный элемент, в котором происходило бы сжигание угля!.. Вдохновленные его призывом исследователи прежде всего обратились именно к этой проблеме. Однако электрохимическое горение угля и оказалось (теперь это отчетливо видно) самым крепким орешком. Задача эта не решена до сих пор.

Трудности таковы.

Как это ни удивительно на первый взгляд, но согласно законам термодинамики (им подчиняется и ход химических реакций) печь должна гореть тем лучше, чем она холоднее. Ибо, утверждают химики, равновесие реакции сжигания углерода в кислороде сдвигается при этом в сторону образования углекислого газа. Однако простое наблюдение — количество угля при хранении на складах явно не убывает! — убеждает: при низких температурах окисление идет муравьиным шагом. Так и получается, что термодинамика говорит «да», а кинетика этого процесса отвечает «нет». В отличие от термодинамики, которая, отвечая на вопрос «куда», указывает лишь общее направление событий, кинетика определяет детали процесса и отвечает на вопрос «как». И побеждает кинетика: уголь горит хорошо лишь при температурах примерно 1000 градусов Цельсия.

Баур и другие изобретатели, действовавшие по рекомендации Оствальда, делали ставку на уголь и высокие температуры. Но здесь их ждали неприятные сюрпризы. Высокие температуры вызывали сильную коррозию электродов и других деталей топливных элементов, что существенно сокращало им жизнь. Кроме того, на искусственное поддержание таких температур тратилась львиная доля электроэнергии, снимаемой с топливного элемента. Овчинка не стоила выделки!

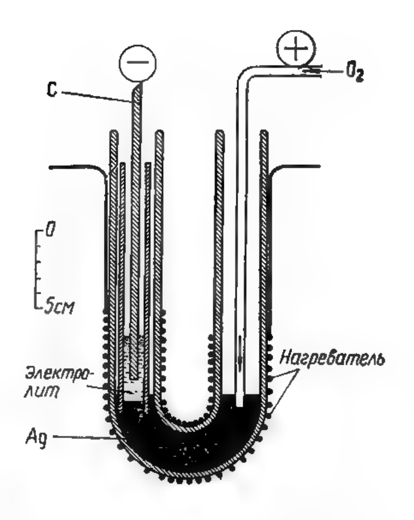


Схема топливного элемента, сконструированного Бауром и Эренбергом в 1911 году для электрохимического сжигания угля в кислороде воздуха; электролитом служила расплавленная сода

Так и получилось, что исследователи и изобретатели не добились успеха на пути, указанном Оствальдом.

Но не только в этом было дело. Сейчас, оглядываясь назад, видно, что Нернст и Оствальд слишком далеко опередили свое время. Тогда не было еще ни теоретических, ни экспериментальных, ни технологических средств решения этой большой задачи. Недоставало многого — сведений по катализу (они появились благодаря развитию химической промышленности), современных материалов (металлов, пластмасс), не было квантовой теории (ее разработка была начата двумя десятилетиями позже выступления Оствальда)...

Какими бы гениальными ни были изобретатели времен Оствальда, они не могли справиться с проблемой, стоявшей на стыке нескольких областей знания, решить задачу, требовавшую совместной работы ученых разных специальностей — электрохимиков, физиков, математиков, специалистов по электронике, пластмассам, химической технологии, электротехнике... Всему этому — новому стилю работы — научились позже: при работе над атомными и космическими проектами.

Наконец, тогда наука еще считалась более или менее личным делом или даже прихотью и в связи с этим плохо оплачивалась. Лишь недавно в передовых индустриальных странах отдельные научные темы стали считать

важнейшими национальными задачами и хорошо финансировать их.

Как бы предчувствуя все эти трудности, Оствальд недаром назвал проблему топливного элемента «философским камнем электрохимии».

Глава 2,

в которой, оставив временно проблемы электрохимической энергетики, обратимся к биологии. Может быть, идее топливных элементов здесь более повезет?

Топливный элемент — в каждой живой клетке?

Жизнь — в работе молекул; никто еще не уяснил себе, ценою каких трагедий и катастроф согласуется бытие молекул в теле человека и создается симфония дыхания, сердцебиения и размышления. Это неизвестно. Потребуется изобретение нового научного метода, чтобы его заостренным инструментом просверлить скважины в пучинах нутра человека и посмотреть, какая там страшная работа.

Андрей Платонов

Сколько одному человеку энергии нужно? Давно известно. Ежесуточно человек потребляет в виде пищи 2000 килокалорий (больших калорий). За год же наберется энергия, равная той, что получится при сжигании 100 килограммов угля.

Человек, оказывается, хороший накопитель энергии. Он может работать, не получая пищи, в течение одних-двух суток. При массе в 75 килограммов взрослый мужчина способен накопить более 2—3 киловатт-часов энергии, что даст 30 ватт-часов на килограмм. Эти цифры в пересчете на единицу массы ставят в иерархии энергий машину, именуемую человеком, выше сжатых газов и всевозможных видов пружин, но ниже кипящей воды.

Совершенная «машина» — человек действует с весьма высоким коэффициентом полезного действия — до 30 процентов. И в процессе работы развивает механическую мощность от 50 до 100 ватт...

Энергетика живого... Как она действует? По каким законам и принципам? Чем отличается от энергетики технической?.. Все это крайне интересные вопросы.

ЧЕЛОВЕК — ПЕЧЬ?

Генри Дейвид Торо (1817—1862), американский писатель, испытав сильное влияние идей Руссо, выступил с проповедью возврата к природе, к ограничению человеком своих потребностей, к жизни физическим трудом. Торо решил показать личный пример: выстроил вдали от людей на берегу озера Уолден хижину, где и прожил два года в полном одиночестве, питаясь лишь тем, что взращивал сам.

Свой опыт он позже описал в книге «Уолден, или Жизнь в лесу». В ней, естественно, Торо в первую очередь подробнейше обсуждает жизненные потребности человека, его нужды, тот минимум, который все же необходим для жизни.

Вот что он писал:

«Согласно Либиху, человеческое тело представляет собой печь, а пища является тем топливом, которое поддерживает внутреннее горение в легких. В холодную погоду мы едим больше, в теплую — меньше. Животное тепло получается в результате медленного сгорания; а болезнь и смерть наступают, когда это горение чрезмерно ускоряется или когда, наоборот, от недостатка топлива или какого-нибудь дефекта в тяге огонь гаснет...»

Человек — это печь... Соблазнительная и простая аналогия, позволяющая вроде бы легко разобраться в энергетике живого. Топливо? Пища. Окислитель? Как и при обычном горении (тут никаких споров нет), кислород воздуха.

Дальше аналогию строить чуть-чуть труднее, но тоже в принципе возможно.

Когда подъезжаешь к ТЭЦ или ТЭС, а то и просто к какой-нибудь фабрике или к котельной, первое, что бросается в глаза,— громадные трубы, которые гордо высятся над остальными постройками. Это характернейший признак любой технической энергоустановки. Для чего делают такие высокие, дорогостоящие трубы? Ответ: для хорошей тяги, чтобы через топку проходило как можно больше воздуха, а с ним и кислорода.

Конечно, труб фабричного типа ни у человека, ни у животных нет. Но углекислый газ живые существа все же выделяют. Еще французский ученый Антуан Лоран Лавуазье (1743—1794) доказал, что вдыхаемый нами воздух имеет совсем иной состав, чем выдыхаемый, что

в последнем гораздо больше углекислого газа, чем в первом. Каждый школьник может повторить опыты француза. Нужен лишь сосуд с известковой водой: водный раствор негашеной извести мутнеет, если туда добавить углекислый газ. Ни кислород, ни азот белой мути не вызывают, так же как и воздух с обычной концентрацией углекислоты в нем.

Природные углеводороды, эта пища тепловых машин, как показывает само название, содержат в своем составе, кроме углерода, еще и водород. Посему при соединении кислорода с водородом должна образоваться вода, ее пары, они также валят из заводских труб. И у человека то же. Какие клубы пара вырываются изо рта, ноздрей, когда человек дышит на морозном воздухе! А если подышать на холодное оконное стекло?..

Можно и дальше проводить параллели, но уже и без того видно, что они все равно не приблизят нас к пониманию энергетики живого. Попробуем зайти с другого конца.

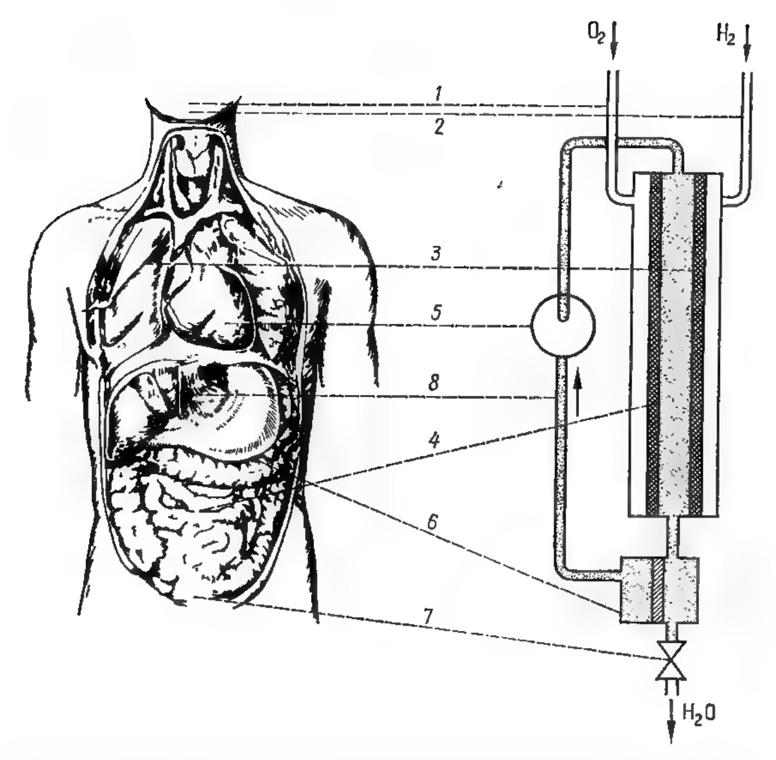
ДЫМ БЕЗ ОГНЯ?

Между крайностями бесконечно огромной шкалы температур затерялся краткий отрезок шириной всего в 100—200 градусов (от минус 100 примерно до плюс 100 градусов по Цельсию). Это границы жизни и смерти. Именно тут, на скромном «пятачке» температур, буквально на «лезвии ножа», и угнездилась жизнь.

Всем известная треска, как выясняется, проявляет максимум биологической активности, когда температура морской воды падает ниже нуля. А самые «горячие» организмы находят среди бактерий и низших растений. К примеру, в горячих источниках Йеллоустонского национального парка в США обитает разновидность водоросли хлореллы, а ведь температура источников — 85 градусов! Известны микроорганизмы, живущие в условиях и более высоких температур — 100 градусов и выше.

То простейшие, а человек? Его жизнь влачится в крайне узкой температурной щели. Норма — это примерно 37 градусов. Несколько градусов вверх (при 42 градусах денатурирует, свертывается белок) и вниз — вот и все, что нам доступно (речь идет, конечно, о температуре человеческого тела).

Нет дыма без огня, гласит пословица. Нет горения без высоких температур, подсказывает житейский опыт.



Аналогия между различными органами человека и водородно-кислородным топливным элементом: *1* — подача кислорода, *2* — подача топлива, *3* — легкие и кислородный электрод, *4* — переработка пищи и водородный электрод, *5* — сердце и насос, заставляющие двигаться кровь (электролит), *6* — почки и ячейка для регенерации электролита, *7* — мочевой пузырь и клапан для выпуска воды, *8* — кровеносные сосуды и трубопроводы для электролита (из книги Юсти Э., Винзель А. Топливные элементы. М., Мир, 1964)

И это, видимо, главный аргумент против уподобления энергетики живого «печной» энергетике.

Торо не случайно оговаривался, что «животное тепло получается в результате медленного горения». Ему вторили другие: «Дыхание — это есть как бы горение без пламени и сильного жара».

Вторили, соглашались и все же цеплялись за простейшую схему: человек сродни печи.

Тут самое время вспомнить, что и в технике, кроме горения горячего (с сильным жаром, высокими темпера-

турами), есть также горение холодное. И напрашивается сама собой новая аналогия: человек — топливный элемент!

И опять раздолье для умственных спекуляций. Они проникли даже на страницы ученых монографий о топливных элементах. В книге немецких электрохимиков из ФРГ Э. Юсти и А. Винзеля есть занятный рисунок: условно изображенный человек (показаны главные органы) и рядом — основные узлы водородно-кислородного топливного элемента. Вот как проводятся параллели. Трубы для подачи водорода и кислорода? Рот. Пористый кислородный электрод? Легкие с их высокоразвитой поверхностью. Пористый водородный электрод? Желудок и кишечник. Насос, обеспечивающий циркуляцию электролита в топливном элементе? Сердце и кровь. Ячейка для регенерации электролита? Почки. Клапан для выпуска воды (продукт электродных реакций)? Мочевой пузырь....

Но, конечно, подобные сопоставления тоже довольно поверхностны и грубы.

ТРУЖЕНИЦЫ МХ

В 1898 году немецкий цитолог Бенда, используя красители, обнаружил в цитоплазме живых клеток крошечные гранулы. Он дал им имя — митохондрии.

Долгое время роль этих малюток была абсолютно неизвестна. Но вот в 30-е годы мощные ультрацентрифуги взломали клетку: удалось выделить митохондрии (МХ, в биохимии трудно без сокращений) в чистом виде.

В 40-е годы на смену стареньким микроскопам пришли электронные. Тут-то наконец и разглядели эти мельчайшие, микронного размера, тельца с двойной мембраной и замысловатыми мембранными складками-кристами.

Вскоре выяснился важнейший факт: МХ оказались силовыми станциями клетки, именно они снабжают организм энергией.

Мы едим жиры, белки и углеводы — это вещества, состоящие из очень крупных молекул, использовать их непосредственно организм не может... Поэтому в желудке и других пунктах пищеварительного тракта идет постепенное дробление молекул-гигантов.

В конце концов что бы мы ни съели — яйцо или бутерброд с маслом и сыром,— пища дробится до элементарных кирпичиков: молекул уксусной кислоты — CH_3COOH. Этот стандартизованный атом пищи (не проще ли заменить бифштекс с жареной картошкой стаканом кислоты?) и поступает в МХ.

Митохондрия — это как бы живая фабрика, цехи которой набиты биологическими катализаторами — ферментами. С их помощью совершается в МХ большой цикл превращений.

Уксусная кислота, соединяясь с щавелевоуксусной, дает лимонную кислоту. Та порождает альфакетоглютаровую, затем последовательно возникают янтарная, яблочная и другие кислоты.

Венчает все синтез щавелевоуксусной кислоты. Круг замкнулся — все готово к приему новых порций унифицированной пищи, новых молекул уксусной кислоты.

Все это давно установлено биохимиками. А цикл, о котором мы только что рассказали, известен в биохимии под разными названиями: цикл Кребса (по имени английского биохимика, добившегося крупных успехов в изучении этого цикла), цикл трикарбоновых кислот, цикл лимонной кислоты.

Почти век назад француз Луи Пастер во время своих знаменитых исследований проблемы порчи вина заметил, что клетки способны жить как без кислорода (брожение, гликолиз), так и с кислородом. Они «охотно» переходят от брожения к дыханию, как только количество кислорода достигнет одной сотой (земные условия на заре биологической жизни!) нынешнего содержания кислорода в атмосфере. Это явление получило название «эффект Пастера».

Подоплека дела ясна: кислород — невероятно эффективный источник энергии.

Один из парадоксов жизни состоит в том, что почти все ее формы нуждаются в кислороде для получения энергии, достаточной для выживания. И в то же время кислород, будучи химически сверхактивным, способен смертельно отравить любой из жизненных компонентов клетки. Как же удалось природе разрешить это противоречие?..

Еще факты для размышления.

В ходе исследований МХ обнаружилось: выделенные и изолированные от клеток, они имеют все необходимое —

коэнзимы, кофакторы, ферменты — для вполне самостоятельного существования. В МХ есть свои собственные отличные от клеточных рибосомы и свой генетический аппарат для синтеза белков. МХ способны к делению и самовоспроизведению (жизнь МХ коротка, длится примерно 10 дней).

Итак, МХ в клетке — это настоящее государство в государстве. Давно уже обратили внимание на огромное сходство митохондрий с бактериями. МХ находятся в непрерывном движении, особенно палочковидные формы, которые постоянно изгибаются и скручиваются (по-видимому, так им легче «охотиться» за кислородом), чем очень напоминают бактерии.

Так вот, существует очень правдоподобная гипотеза (возможно, скоро она станет общеизвестным фактом): МХ — это пришельцы-завоеватели, примитивные бактериоподобные организмы, проникшие в клетку и приспособившиеся к жизни в ней. Произошел симбиоз: МХ, умеющие утилизировать все «сжигающий» кислород, обильно снабжают им клетку; клетка же дает МХ пищу — «топливо».

Этот союз, заключенный, по мнению сторонников этой гипотезы, в доисторические времена, когда кислородная атмосфера на Земле только зарождалась, длится уже многие сотни миллионов лет. Природа, найдя удачное решение, тысячекратно повторила его, чеканя всевозможные клетки, как серебряные рубли,— всегда на один лад, лишь шлифуя свою находку.

Древние бактерии, сыгравшие такую ключевую роль в становлении жизни на Земле, МХ вполне достойны памятника. В Колтушах благодарный И. П. Павлов соорудил памятник собаке. Видимо, придет время, и где-нибудь перед Институтом биоэнергетики (пока его нет, но он непременно будет!) поставят монумент этой скромной труженице, которая миллионы лет несет свою бессрочную вахту жизни.

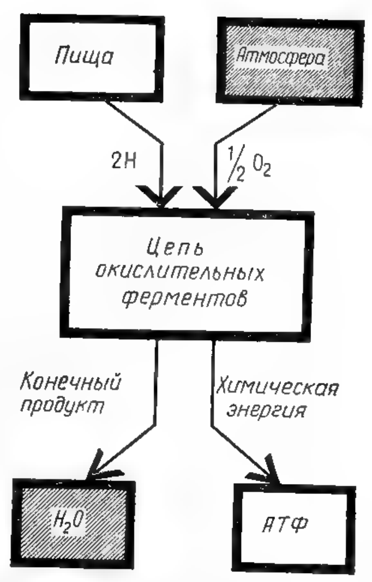
В РОЛИ ФИГАРО — АТФ

О митохондриях, этих биофабричках, можно рассказывать бесконечно: о том, как ведут они себя при стрессе, как влияют на долголетие, умственную силу... Но нас интересует энергетика. Как образуется в МХ энергия?

В какой форме? Имеет ли энергетика живого аналога в технике? Какие?..

Конечно, красоты ради и высокого слога МХ можно по старинке уподоблять печи, куда для сжигания топлива (читай: пищи!) через «форсунки» поступает кислород воздуха (дыхание).

Можно, но будет это большой натяжкой, ибо живая природа вынуждена была решить энергетическую проблему, минуя малоэффективную тепловую стадию. Жизнь не могла себе позволить высоких температур, давлений и всего того, чем располагает нынешняя техника. Экономности, высоких кпд надо было добиться в поразительно мягких условиях: при обычных земных температурах, при столь же обычном атмосферном давлении, в водной среде...



В клетках живого организма тоже идет холодное горение водорода и кислорода

Нет, гораздо удобнее биоэнергетику сравнивать с топливными элементами (хотя любая аналогия, как известно, хромает), потому что, как выяснили ученые, в ее основе в качестве обязательного звена лежит холодное горение водорода в кислороде.

Биохимики установили, что биологический водородно-кислородный топливный элемент как бы вмонтирован, впечатан в каждую клетку. Не вдаваясь в биохимические и биофизические тонкости, укажем лишь, откуда в организме человека берется водород (окислитель же — кислород — поступает в легкие из воздуха, всасывается в кровь, соединяется с гемоглобином и так разносится по всем тканям). Источником водорода служит пища — жиры, углеводы, белки. Мы помним: в желудке, кишечнике, клетках пища в конечном итоге дробится до элементарных кирпичиков — до так называемых жирных кислот (яблочная, янтарная и т. д.).

Но на этом процесс дробления пищи не заканчивается. В цикле Кребса под действием ферментов все низводится до еще более простейших элементов: воды, углекислого газа (этот побочный продукт биоэнергетики мы частично выдыхаем) и атомов водорода.

В нем-то все дело! Дальше пути биоэнергетики таковы.

Атомы водорода (накопителем их является дифосфопиридиннуклеотид — ДПН сокращенно) распадаются на протоны и электроны, которые временно разлучаются.

Электроны, двигаясь по специально устроенной природой в МХ цепочке ферментов («дыхательная цепь»), в конечном итоге воссоединяются с протонами и атомами кислорода, образуя итоговый продукт — воду.

Если кратко, схематически попытаться изобразить идущие в МХ биоэнергетические процессы, получится вот что:

Пища → 4(H^+/*протон*/ + e^-/*электрон*/) + O_2 /*кислород*/ → $2H_2O$ /*вода*/.

АДФ + Ф → АТФ

Что содержится в верхней части схемы, читатели, мы надеемся, уже понимают. По сути, то же, что и в водородно-кислородном топливном элементе. Высоких температур тут нет, процесс идет медленно, плавно, с высокими кпд.

Теперь: что делать с электроном? В топливном элементе бегущие по внешней цепи электроны могут, допустим, зажечь электролампу. А что делать с микротоками, образующимися в клетке?

Электричество обладает существенным недостатком: его надо сразу же использовать, хранить, «консервировать» его трудно. Отчасти поэтому, отчасти по другим не менее веским причинам природа обошлась без проводов и кабелей.

Вот что она придумала. Взглянем вновь на нашу схему. Бегущий по дыхательной цепи, от водорода к кислороду, электрон «по пути» своей энергией (его электрический потенциал непрерывно понижается) запускает химическую реакцию соединения (нижняя часть схемы) аденозиндифосфорной кислоты (АДФ) с фосфатом (Ф).

Так синтезируется богатое химической энергией соединение — аденозинтрифосфорная кислота (АТФ), универсальный датчик энергии для всевозможных процессов, протекающих в организме.

Итак, если в технике человек стремится химическую энергию топлива превратить в электричество, то природа химическую энергию пищи (то же топливо) преобразует сначала в электрические формы, а затем (тут же!) консервирует электричество опять в энергию химических связей.

АТФ — вот она разменная, универсальная, унифицированная энергетическая валюта для всего сущего. При расщеплении АТФ (три фосфатных группы) до АДФ (два фосфата) и далее до АМФ (аденозинмонофосфорная кислота, один фосфат) запасенная энергия выделяется и может служить самым различным целям.

АТФ в клетке, словно Фигаро, и здесь, и там — всюду! Химическая энергия АТФ может быть преобразована в механическую энергию (мышцы, сердце, жгутики бактерий), осмотическую работу (секреция желез, всасывание в кишечнике), электричество (нервные клетки, электрические органы некоторых рыб), свет (светляки) и так далее и так далее.

АТФ может обеспечивать организм даже теплом. В простейшем варианте энергия, выделяющаяся при распаде АТФ, и есть то тепло, которое согревает организм теплокровных животных — от мышей до человека. Так животные поддерживают постоянную температуру тела даже в самые сильные морозы.

Реакция синтеза АТФ, имеющая для всей проблемы биоэнергетики ключевое значение, называется окислительным фосфорилированием. Это очень сложный механизм, интимные стороны которого и сейчас еще полностью не ясны.

Разгадать их и пытаются биохимики.

ГЛЮКОЗА — ПИЩА ДЛЯ МОЗГА

Конечно, ставить между биоэнергетикой и топливными элементами знак тождества нельзя. Различий немало. Вот хотя бы такое.

Уголь, водород, окись углерода, ацетилен, светильный газ, нефть, сахар и многое другое может служить топливом для топливного элемента. И окислители для топливных элементов — это не только кислород: и перекись во-

дорода, и многие другие самые разнообразные вещества.

Собственно, разность потенциалов возникает между любой парой различных металлов, погруженных в подходящий электролит и приведенных в соприкосновение, с одной стороны, с топливом, с другой — с окислителем.

Весь вопрос в том, есть ли прок от такой системы? Достаточно ли велик ток? Дешевы и доступны ли катализаторы?

В 1911 году английский ученый Поттер заметил: между двумя электродами, один из которых погружен в растущую культуру бактерий, другой — в стерильную (без бактерий) контрольную среду, также возникает разность потенциалов.

Так, видимо, был создан первый биохимический топливный (биотопливный) элемент. В нем электроэнергию нарабатывают микроорганизмы.

Значение подобных устройств трудно переоценить: ведь с помощью бактерий можно было бы превращать в электричество любые биологические и иные отбросы — компосты, мусор. При этом электролитом может служить дешевая морская вода.

Образцы биохимических топливных элементов уже построены. Например, установка с бактериями Aeromonas formicans, созданная американскими исследователями. Батарея состояла из трех последовательно соединенных элементов. Питательная среда в них — сок кокосовых орехов. Ста миллилитров сока (это меньше содержимого одного ореха) хватило, чтобы 50 часов питать транзисторный приемник, потребляющий ток силою 10 миллиампер при напряжении 1,5 вольта (о такой энергоустановке Робинзон Крузо мог бы только мечтать!).

Топливные элементы поразительно неприхотливы в выборе топлива — пищи.

А живая материя? Наоборот. Оказывается, чем совершеннее формы жизни, тем они капризнее в выборе энергетического сырья.

На Земле до сих пор венцом совершенства остается человеческий мозг. Ему для работы нужно всего 10 ватт энергии, а действует он много лучше, чем самые совершенные ЭВМ, потребляющие те же ватты, но ни по отдаче, ни по объему пока не идущие с мозгом ни в какое сравнение.

Правда, мозг очень разборчив в пище: всему предпочитает исключительно глюкозу. Почему? Потому что глюкоза, сгорая до воды и углекислого газа, отдает всю заключенную в ней энергию, не оставляя в мозговой ткани каких-либо не до конца использованных продуктов обмена.

Сгорание одной молекулы глюкозы позволяет «подзарядить» 38 молекул АДФ, переводя их в АТФ. Это значит, что на одну грамм-молекулу (180 граммов) глюкозы выделяется 300 килокалорий энергии, которая запасается в мозговых клетках.

Это очень много. И тут ясно видна разница между биоэнергетикой высшей (в МХ, с использованием кислорода) и низшей (брожение или глюколиз, древнейший путь биоэнергетики). Ибо при гликолизе сжигание той же молекулы глюкозы дает не 38, а лишь две молекулы АТФ.

Мозг остро нуждается в глюкозе и кислороде. Падение содержания сахара в крови ведет к нарушению поведения, бреду, потере сознания, и в конце концов дело заканчивается структурными повреждениями мозга, что приводит к смерти.

В состоянии покоя мозг потребляет около двух третей всей циркулирующей в крови глюкозы и 45 процентов кислорода...

Глава 3,

про Афродиту, вышедшую якобы из структурированного электролита, про электрических угрей — их даже собирались взять в космический полет, о лягушках — им столь многим обязана современная техника; про алюминий, или «серебро из глины», о подлостях коррозии и благости ЭХРО и еще про разную всячину, которая имеет явный электрохимический привкус

Второе рождение электрохимии

Каждая наука, как и каждая истина, есть дочь своего времени.

Микеле Джуа. История химии

В 1962 году на высоком берегу Тигра, южнее Багдада, археологи нашли загадочные конусообразные керамические сосуды: внутри находились медные цилиндры и железные бруски. Здесь же раскопали и позолоченные серебряные украшения.

Вручную нанести тонкий слой золота поверх серебра невозможно. Неужели древние шумеры смыслили в электролизе? Умели пользоваться гальваническими элементами?

Уж не тогда ли родилась электрохимия?

Науки, как люди, рождаются, мужают, стареют... Как реки, начинаются они с беспомощного ручейка, постепенно набирают силу и, становясь полноводным потоком, впадают в безбрежный океан Знания.

И судьба у каждой науки своя: взлеты, падения, счастливое стечение обстоятельств, мода и настойчивые потребности эпохи...

НА ГЕРБЕ — ЛЯГУШКА

ГАЛЬВАНИ (1737—1798), итальянский анатом и физиолог. Родился в Болонье. В молодости изучал богословие, но затем увлекся медициной. Образование получил в Болонском университете (основан в XII веке), там же с 1762 года (его диссертация была посвящена изучению природы костей, их образованию) преподавал медицину, там же после смерти своего учителя и тестя профессора Галеацци в 1775 году стал профессором анатомии. К счастью для Гальвани, электрические машины, такие, например, как лейденская банка, были тогда в центре внимания ученых. Их можно было встретить в любой лаборатории, имелись они и у Гальвани, который вел анатомические и физиологические исследования. Это обстоятельство и позво-

лило Гальвани обнаружить так называемое «животное электричество». Имя Гальвани, основоположника электрофизиологии, одного из крестных отцов электрохимии, легло в основу многочисленного племени научных терминов: гальванизация, гальванометр, гальванические элементы, гальванопластика, гальваностегия и т. д. (Кстати, долгое время вместо слов «электрический ток» употребляли название «гальванический ток».) Однако удачной научную карьеру Гальвани назвать трудно. Идея о «животном электричестве» была опровергнута опытами Вольты. К этому прибавились и разочарования «служебного порядка». В 1797 году он отказался принести присягу на верность новому правительству Северной Италии (ее ввел молодой французский генерал Наполеон Бонапарт) и потерял профессуру. Нужда, научные неудачи, состояние глубокой подавленности (он потерял горячо любимую жену и помощницу Лючию, умерли его брат и два молодых племянника), в которое он впал, ускорили его конец. Он терпеливо, как говорит его биограф Вентуроли, ждал смерти, стараясь найти утешение в философии и религии. Почести, которых Гальвани мало видел при жизни, пришли после смерти.

Не каждая наука может похвастать датой своего рождения. Однако год рождения электрохимии можно указать абсолютно точно. В 1791 году в седьмом томе сочинений академии в Болонье вышла написанная по латыни статья Луиджи (Алоизия) Гальвани «Трактат о силах электричества при мышечном движении».

В средние века у химии существовал свой символ — змея, кусающая собственный хвост. Не нужно искать в этом образе излишнюю многозначительность. Он просто подчеркивал тот прозаический факт, что каждая химическая реакция может идти как в ту, так и в другую сторону.

Если бы возникла необходимость придумать герб для электрохимии, на нем непременно надо было бы изобразить лягушку. Ей электрохимия обязана многим.

Экспериментировал Гальвани с разными животными, но чаще всего с лягушками. Это обстоятельство, кстати, увековечено даже на мемориальной доске, установленной на доме, где жил ученый.

Как всякое значительное научное открытие, опыты Гальвани позднее обросли легендами. Одна из них гласит, будто бы врачи прописали синьоре Гальвани «укрепительный бульон» из лягушечьих лапок. И что будто бы все с этого и началось...

Оставим, однако, легенды и послушаем историков.

Марио Льюцци в своей «Истории физики» приводит такой рассказ Гальвани: «Когда один из моих помощников острием скальпеля случайно очень легко коснулся внутренних бедренных нервов... лягушки, то немедленно

все мышцы конечностей начали так сокращаться, что казались впавшими в сильнейшие... судороги...»

Собственно, если в целях более четкого осознания реконструировать события двухсотлетней давности, сотканные из множества случайностей, то дело можно представить таким образом.

Препарированная лягушка висела на медном крючке на балконе. Ассистент прикоснулся к ней проволокой, другой конец которой лежал на железных перилах. И лягушка «ожила». Лапы ее начали делать такие движения, словно она прыгала. Ошеломленный ассистент, с криком ворвавшись к Гальвани, потащил его на балкон...

Величайшая заслуга Гальвани в том, что он не прошел мимо необычного феномена. У него явилось, как он писал позднее, «до невероятности страстное желание» выяснить причину этого явления. Десять лет ушло на всевозможные варианты опытов. В конце концов Гальвани приходит к твердому выводу: внутри лягушки есть особое «животное электричество».

Исследования итальянского ученого вызвали величайший интерес и принесли много горя бедным лягушкам. Все повторяли и легко подтверждали опыты Гальвани, а лягушки оплачивали это научное поветрие своими жизнями.

Шум был поднят страшный. Физиологи полагали, что удалось проникнуть в тайну жизни, заключающуюся в электричестве. Медики предлагали средства исцеления различных болезней. Профаны строили широчайшие обобщения...

ФИЗИК СПОРИТ С БИОЛОГОМ

ВОЛЬТА (1745—1827), итальянский физик. Родился в городке Комо в знатной, старинной и богатой семье. Чудо-ребенком (в семье из девяти детей) не был: говорить начал только с четырех лет, родители даже считали его тупицей. Учился в школе ордена иезуитов. Под влиянием книги Д. Пристли «История электричества» в 14 лет решил стать физиком. Страсть его к изучению модных тогда электрических явлений была столь велика, что в 19 лет он написал на эту тему длиннейшую поэму на латинском языке. Преподавал физику в гимназии в Комо. Изобрел множество электрических приборов: электрофор, электрометр, конденсатор, электроскоп. Слава его росла: в 1799 году стал профессором университета в Павии. Дружил с Гальвани (они оживленно переписывались), но вскоре, увлекшись изучением «животного электричества», стал идейным противником Гальвани («партию» Вольты из маститых поддерживал француз Кулон, «партию» Гальвани — немец Гумбольдт). Слава Вольты достигла

зенита, когда он изобрел первый источник постоянного электрического тока, названный затем вольтовым столбом. В 1801 году во Франции в Парижской академии наук Вольта демонстрирует свое изобретение всемогущему тогда Наполеону Бонапарту. На ученого посыпался поток почестей в виде медалей и отличий (получил и орден Почетного легиона), в 1810 году (по ходатайству Наполеона) стал графом и сенатором Королевства Ломбардии. Как и Лаплас, умел ладить с сильными мира сего: когда в Италии австрийцы сменили французов, Вольта по-прежнему получал знаки отличия и почетные должности. Однако истинную славу ему дали не монархи, а его коллеги по науке: именем его названа единица электродвижущей силы — вольт.

Между тем на страницах научных журналов шла страстная полемика двух партий: сторонников и противников учения Гальвани. Оппозицию возглавил профессор Алессандро Вольта. Его опыты со всей очевидностью вроде бы показали, что не таинственная «жизненная сила» электризует мышцы и нервы лягушек. «Электрический флюид» возникает при соприкосновении двух разных металлов (вспомним медный крючок и железные перила в опыте Гальвани), а лягушки лишь играют роль чувствительного прибора для обнаружения электричества.

Главный удар Вольта нанес в 1800 году, когда предложил миру знаменитый вольтов столб. Он взял 60 кружков серебра (скорее всего, это были монеты — серебряные полукроны) и, чередуя их с 60 кружками цинка, каждую пару пластинок отделил друг от друга кусочками влажного картона. Прикоснувшись пальцами к верхушке и основанию столба, можно было почувствовать основательный удар током.

Так появился первый электрохимический генератор тока, сделавший, казалось бы, бессмысленным всякий разговор о животном электричестве.

Так в споре Гальвани с Вольтой рождалась электрохимия.

Вначале (да и сейчас, собственно, так обстоит дело) направленность новой науки имела явно технический характер. Исследователи и практики получили наконец в свое распоряжение длительно действующие электрические токи (разряд лейденских банок длился лишь микросекунды).

В 1804 году была сделана первая попытка создать электрический телеграф.

В 1834 году русский академик Б. Якоби построил первый практический электродвигатель; в 1838 году он

уже испытывал лодку с таким двигателем на Неве под Петербургом.

Химические источники тока (сокращенно ХИТ) — все эти столь известные нам в быту батарейки и аккумуляторы — используются сейчас всюду. Век автомобиля и подводной лодки, самолета и радио — XX век — предъявил совершенно новые требования к масштабам производства. Количество ХИТ исчисляется теперь миллиардами.

Утверждают, если бы удалось одновременно включить все ХИТ мира, они развили бы суммарную мощность, сравнимую с мощностью всех электростанций планеты (около 10^9 кВт).

Здесь необходимо, однако, оговориться. В отличие от непрерывно действующих электростанций автономные источники работают лишь кратковременно (скажем, аккумулятор надо периодически заряжать), с большими перерывами. Поэтому общая электроэнергия ХИТ (если сравнивать ее с энергией электростанций) невелика.

Зато ХИТ привлекательны широким спектром электрических мощностей: они способны подстроиться под любой вкус и при этом действовать совершенно автономно. Это и миниатюрные элементы в наручных электрических часах (их мощность порядка 10^{-5} ватта), и аккумуляторные батареи на подводных лодках, развивающие мощность до 10^7 ватт.

Соответственно, и масса такой автономной «химической электростанции» колеблется от долей грамма до сотен тонн.

ЗАПОЗДАЛЫЙ РЕВАНШ ГАЛЬВАНИ

Вольта пожинал плоды своей громкой славы, Гальвани в унынии и горести ждал близкой смерти.

Что делать! Как это часто случается и в наши дни, в научном споре биолог был вынужден уступить физику. Лишь многие десятилетия спустя взгляды Гальвани были реабилитированы. Хотя в новых опытах в последние годы своей жизни Гальвани (опубликованы в 1797 году) и доказал: мышца лягушки сокращается и без прикосновения к ней металлов (чистоты ради ученый препарировал лягушек стеклянными ножами...) — мало кто прислушивался к его одинокому голосу.

Но именно этими экспериментами было положено

начало быстро развивающейся в последнее время и очень перспективной науке — биоэлектрохимии. Она изучает генерацию и распространение импульсов тока в нервных волокнах, энергетику клетки, распространение возбуждений в коре головного мозга, в сердечной мышце и многие другие биовопросы, имеющие явную электрохимическую основу.

Но, пожалуй, самый яркий для биоэлектрохимии пример — это электрические рыбы.

Еще римский врач Скрибоний Ларг рекомендовал применять разряды электрического ската Torpedo в качестве средства против подагры, головной боли и эпилепсии.

Без сомнения, рыбы с электрическими органами издревле известны людям (во всяком случае, рыбакам), так что первые факты знакомства человека с проявлениями биоэлектрохимии трудно датировать с большой точностью.

Способности электрических рыб феноменальны: у них есть особые органы, вырабатывающие мощные электрические импульсы. Морской электрический скат, к примеру, создает разряды напряжением до 60 вольт и силой тока до 50 ампер. Электрические угри и сомы обладают «живой батареей» с напряжением до 500 вольт.

Такие мощные выстрелы может «позволить» себе лишь совершеннейший электрический аппарат. И действительно, у ската электрический орган состоит из стопки (вольтов столб?) элементов (их около тысячи!), соединенных последовательно, а сами «батарейки» — у ската их 2000 — подключены параллельно. Что и позволяет достичь столь высокого напряжения.

Эти сверхкачества рыб позволили высказать неожиданное предложение практического характера: японские ученые в свое время предлагали использовать электрических угрей в качестве источников электроэнергии при космических полетах...

Биоэлектрохимии, так смело вторгающейся в тайны живого, несомненно суждено большое будущее. Тут уместно вспомнить слова Фарадея: «Как ни чудесны законы и явления электричества, выявляющиеся нам в мире неорганического или мертвого вещества, интерес, который они представляют, вряд ли может сравниться с тем, что присуще той же силе в соединении с нервной системой и жизнью».

И СИЛА, И СЛАБОСТЬ

ФАРАДЕЙ (1791—1867), английский ученый, сын бедного лондонского кузнеца. Недолго посещал школу, в возрасте 14 лет, поступив учеником к переплетчику, пристрастился к чтению книг, которые переплетал. Под влиянием публичных лекций X. Дэви (1778—1829) Фарадей решил посвятить себя науке. Написал Дэви письмо с просьбой о содействии (приложил к письму тщательно составленные и аккуратно переплетенные записи его лекций). Не без колебаний Дэви предложил ему место лабораторного служителя. (Позднее на вопрос, какое самое значительное его научное открытие, Дэви отвечал: «Майкл Фарадей».) В качестве ассистента и служителя Дэви Фарадей два года (1813—1815) путешествовал по «научной» Европе (лаборатории Франции и Италии), где перезнакомился со всеми выдающимися учеными того времени. С 1815 года начинается напряженная научная работа Фарадея в Королевском институте (Лондон). Главная идея исследований Фарадея была записана в его лабораторном дневнике: «Превратить магнетизм в электричество». От этих работ ведут свою родословную все генераторы, электромоторы и трансформаторы — практически вся современная электротехника. В 1824 году Фарадея избрали членом Королевского общества, несмотря на явное противодействие его президента — всемогущего Дэви. В 1825 году Фарадей стал директором лаборатории в лондонском Королевском институте, сменив на этом посту Дэви. Та одержимость, с которой Фарадей отдавался научной работе, не могла не отразиться на его здоровье, и он дважды по болезни прекращал научные занятия, а в 1860 году совсем оставил их. Имя этого ученого увековечено во многих терминах и понятиях физики: фарада, фарадей, Фарадея число, цилиндр Фарадея и т. д. Русский физик А. Г. Столетов писал: «Никогда со времен Галилея свет не видал стольких поразительных и разнообразных открытий, вышедших из одной головы».

Без технической электрохимии просто невозможно представить себе нашу жизнь. Самое крупное из электрохимических производств — производство хлора: мировая промышленность ежегодно выпускает свыше 25 миллионов тонн этого продукта.

Электрохимическим путем получаются и многие металлы: медь, цинк, магний, свинец, бериллий и, наконец, самый из них распространенный — алюминий. Этот легкий, с сероватым блеском металл проник даже на кухни (в виде кастрюль и мисок) и стал опорой индустриального общества. Сегодня в ряду металлов, служащих человеку, он уступает только чугуну и стали.

Разгадка столь явного успеха алюминия в его универсальности.

Покрытая тончайшим слоем алюминия синтетическая ткань надежно защищает туриста от холода на ночевке. Нанесите несколько десятков граммов алюминия на

асбестовый костюм — жар огня не будет страшен пожарному. Смешайте порошкообразный алюминий с подходящим бесцветным лаком — полу́чите стойкую краску.

В наряд из волшебного металла облачают грузовики, вагоны, дома, небоскребы. Все больше алюминиевых судов — от траулеров до прогулочных катеров — бороздят реки, озера и моря. Паутина алюминиевых проводов несет электричество во все уголки нашей планеты.

Век каменный, бронзовый, железный... Наше время многие называют «алюминиевым веком». А подарили человеку этот чудо-металл электрохимики. Именно они указали способ его получения.

Зачерпните горсть земли — скорее всего в вашей руке окажется изрядная толика алюминия: ведь он составляет двенадцатую часть земной коры. Только вот беда: в отличие, скажем, от золота, меди, железа, в свободном состоянии в виде самородков алюминий в природе почти не встречается. Существует, как правило, лишь в соединениях с другими элементами. Чаще всего с кислородом, образуя очень твердые кристаллы — окись алюминия. Окрашенная окислами других металлов, она составляет основу таких драгоценных камней, как рубин и сапфир.

Как получить чистый алюминий? Попытки извлечь этот «глинометалл» делал еще Х. Дэви. Он-то и назвал его алюминием.

Нужен был достаточно дешевый способ получения алюминия, чтобы он перестал быть металлом полудрагоценным. Добиться этого помог электролиз. Электрохимический процесс, законы которого в 1834 году, сблизив химию и электричество, открыл Майкл Фарадей.

Фарадей был физиком, химиком, физикохимиком, интересовался биологией — словом, Фарадей был Фарадеем. Но кроме того, он был еще и одним из корифеев электрохимии. Открытые Фарадеем законы электролиза изучает сейчас каждый школьник. Это Фарадей, оказывается, придумал все названия, которые мы произносим, говоря о любом из электрохимических процессов: электрод, анод, катод, электролит, ионы...

Суть электролиза крайне проста. Электрическое поле разгоняет находящиеся в растворе (обычно водном) ионы в разные стороны: плюсы (катионы) в одну, минусы (анионы) в другую. Так разные компоненты до того единого вещества откладываются на противоположных,

погруженных в электролизную ванну электродах. Так удается извлечь из расплава и чистый алюминий.

Наступлением «века алюминия» человечество обязано электрохимии — именно ею был найден дешевый способ получения этого металла. Многие годы неотступно думал о таком способе американец Чарлз Холл.

Сын священника Холл работал в сарае, за приходским домиком. Его лабораторное оборудование состояло из сковороды, подержанной бензиновой печи да самодельных тиглей.

Ставку он делал (как когда-то и Дэви) на электролиз.

И в 1886 году Холл наконец получил «серебро из глины». Поразительно, во Франции одновременно успех сопутствовал — тоже 22-летнему! — Полю Эру; и действовал он тем же методом; добавим для «неправдоподобия», что оба изобретателя и скончались-то почти в одно и то же время: в 1914 году.

И началось победное шествие алюминия.

Вскоре место примитивных тиглей и батарей заняли большие электролитические ванны (электролизеры), с растворенным в расплавленном криолите глиноземом (Al_2O_3), где мощный электрический ток разлагал глинозем на составные части.

В 1977 году установки такого типа во всем мире дали 14,5 миллиона тонн алюминия.

По счастливой случайности, развитие электроэнергетики шло параллельно с развитием производства алюминия. Тут «крылатому металлу» сильно повезло.

Да иначе и быть не могло! Любой вид электролиза требует немалой электроэнергии. Силу электрохимической промышленности придает электровооруженность той или иной страны, дешевизна электричества.

Сила и слабость.

Производство того же алюминия — одно из самых энергоемких: чтобы получить тонну первичного алюминия, нужно затратить около 16 тысяч киловатт-часов электроэнергии. Этим и объясняется медленное увеличение производства столь удобного и привлекательного материала.

Получается своеобразное иждивенчество. Успех электрохимической промышленности зависит от успехов электроэнергетики. Если бы завтра управляемый ядерный синтез обеспечил человечеству море практически бес-

платной (как надеются многие) энергии, то наверняка наступил бы золотой век и электрохимии, и ее производства. Если бы!..

Но тут есть одно обнадеживающее обстоятельство. Вспомним про топливные элементы. Вспомним, что электрохимические устройства могут быть не только потребителями энергии; они ведь способны также и производить ее.

Так нужда в крупной электрохимической энергетике (не батарейки для карманных фонариков) вновь и настойчиво ставится на повестку дня.

РЕБЕНОК, ТУЧА И ДОЖДЬ

ФРУМКИН (1895—1976), создатель советской электрохимии. Родился в Кишиневе, учился сначала в Одессе — в Новороссийском университете, затем за границей — в университетах Страсбурга и Берна. В 1922 году начал научную работу в Москве, в Физико-химическом институте, носящем ныне имя Л. Я. Карпова. В 1932 году избран действительным членом АН СССР. С 1930 года до конца жизни заведовал кафедрой электрохимии МГУ. В 1958 году основал в Москве Институт электрохимии, теперь это Институт электрохимии имени А. Н. Фрумкина АН СССР. Скончался, можно сказать, на боевом посту, приехав в Тулу, чтобы принять участие в совещании электрохимиков. Похоронен в Москве на Новодевичьем кладбище.

В 1965 году в день своего 70-летия Александр Наумович Фрумкин получил множество подарков. Самый необычный из них преподнесли сотрудники кафедры электрохимии МГУ. То был полуабстрактный «портрет». Предполагалось, что на нем изображен сам юбиляр. Сходство портрета с оригиналом не было уж совсем надуманным: ведь каждая линия этого «шедевра», порожденного сразу и наукой и искусством, была взята из научных работ академика.

Увы! Высокое искусство не всегда доступно простым смертным. Поэтому позднее на страницах журнала «Химия и жизнь» пришлось сделать к «портрету» науковедческий комментарий. Он объяснил каждую черточку: был тут и условно изображенный «нос» в виде ртутной капли, и S-образная изотерма Фрумкина, и условно поданный вращающийся дисковый электрод с кольцом, и многое иное, что занимало мысли юбиляра на протяжении долгих десятилетий. Но — поразительно! — никто тогда не обратил внимания: на портрете не нашлось места для топливного элемента. Проблемы, которая волновала

Фрумкина всю его жизнь. Ведь даже в предвоенные годы, когда будущее топливных элементов еще казалось зыбким и призрачным, академик писал в журнале «Советская наука»: «Электрохимики никогда не оставляли надежды, что время гальванических элементов еще вернется и что последние вновь будут применяться в более широком масштабе как источники электроэнергии».

В послевоенные годы Фрумкин более настойчиво обращается к этой теме. Однажды он беседовал с журналистами. Обсуждая недостатки традиционной тепловой энергетики, он нарисовал яркий образ:

— Представьте себе мучимого жаждой человека. Он добрался наконец до воды, зачерпнул полный стакан, но... к губам ему удается донести лишь треть. А ведь именно в таком положении находится человечество: из наполненного до краев кубка энергии ему удается полезно использовать лишь малую часть. Две трети добытой из-под земли тяжким трудом людей химической энергии топлива пропадает зря...

Этими словами Фрумкин отмечал, какую бы мы получили выгоду, если бы горение обычное удалось заменить «холодным».

Но Фрумкин не только мечтал о топливных элементах, он торопил события, закладывая вместе со своими многочисленными учениками теоретические основы функционирования этих устройств.

Ребенок, видя тучу, знает: сейчас пойдет дождь. Но он, конечно, плохо разбирается (да подчас и взрослый!), что же все-таки происходит в туче.

Такими «детьми» долгую эпоху оставались и ученые-электрохимики, когда речь заходила о проблеме возникновения электродвижущих сил в любом ХИТе и, в частности, в топливных элементах.

Почему и как возникает разность потенциалов на погруженных в электролит металлических электродах, которые, собственно, и являются источниками электрического тока? Этот главный вопрос оставался до сравнительно недавнего времени во многом нерешенным.

Школа академика Фрумкина (ее авторитет в мировой науке и при жизни Александра Наумовича, и сейчас очень велик) и ставила своей целью понять механизм возникновения «электрохимического дождя», чтобы научиться вызывать обильные «электрические ливни».

В 60-е годы — о чем речь еще впереди — эти исследования неожиданно стали крайне актуальными. Поэтому уже не только проблема топливных элементов, а вся электрохимия пережила как бы свое второе рождение.

Электрохимические исследования велись тогда во всем мире широким фронтом и на всех уровнях. И научный урожай был велик. А топливные элементы крепко встали на ноги. Настолько, что с ними стали связывать и будущее энергетики. Согласно прогнозам американских ученых, по мере истощения запасов природного топлива человечество вступит в атомно-электрохимическую эру. Гигантские атомные электростанции на берегах Мирового океана будут давать электроэнергию. Она пойдет на разложение воды электролизом на водород и кислород. Водород будут затем транспортировать потребителям по трубопроводам; расчеты говорят: передача энергии в химической форме гораздо выгоднее, чем передача электричества по проводам. И уже там, на месте, его будут сжигать, но не в тепловых машинах, а, что гораздо рентабельнее, в топливных элементах.

Так возникают контуры водородной энергетики.

Другой вариант той же картины — разложение воды за счет солнечной энергии.

Вот проект, детальные расчеты для которого были сделаны в ФРГ. Солнечное тепло нагревает черные пластины до 120 градусов. Термоэлементы генерируют ток, используя перепад температур между этими пластинами и морской водой. Электроэнергия идет опять же на электролиз воды, дающий водород.

Подобная электрохимическая гелиостанция площадью в 920 квадратных километров, расположенная на широте Гибралтара, обеспечила бы почти все потребности ФРГ в электроэнергии. Цена такой программы — около 3 (сейчас, может быть, уже и намного дороже) миллиардов марок...

КОРРОЗИЯ — ВРАГ И ДРУГ

Ведя рассказ про электрохимию, трудно обойти молчанием такой явно электрохимический процесс, как коррозия. Ржавчина (если выражаться не очень точно, но просто) — это беспощадный враг. Тут электрохимия работает против человека. Проржавленные и вышедшие из строя водопроводные трубы, буквально гниющие на

открытом воздухе автомашины, металлолом, который собирают,— все это «проделки», козни коррозии.

Нельзя сказать, чтобы электрохимия очень уж разнообразила набор своих средств. Отнюдь нет. Одни и те же процессы происходят и в автомобильном аккумуляторе и в ржавеющем железе. В последнем случае коррозия пользуется несовершенством нашей металлургической технологии. Чем меньше оказывается в металле примесей, тем более он коррозионностоек. В Индии есть созданная в глубокой древности колонна из очень чистого железа. Многие века стоит она в жарком и влажном климате, где укусы ржавчины должны быть особенно сильны, а «шрамов» коррозии на колонне нет. Но это исключение. Правило же таково, что любой металл, каким бы чистым его ни старались выплавить, обязательно содержит в себе примеси посторонних веществ. И каждая такая крупица примеси — один из полюсов крохотного гальванического элемента. Второй полюс — частицы самого металла, расположенные вокруг крупинок примеси. Нет только третьего компонента — электролита?.. Его хватает с избытком: в любой воде, в том числе и в дождевой, содержатся в растворе (очень и очень слабом, правда) кислоты и щелочи. Они есть даже во влажном воздухе. Вот вам и электролит: он окружает металлы буквально со всех сторон. Все готово для электрохимического действа. И идут электрохимические реакции, вырабатывается и электрическая энергия, только здесь она приносит не пользу, как в топливном элементе, а огромный вред, разрушая металлы.

По некоторым данным, коррозия ежегодно съедает 12 процентов производимого во всем мире металла, что примерно равно годовому производству стали таких стран, как Швеция, Финляндия, Италия и Бельгия, вместе взятых. Фактически каждая восьмая домна «работает» на коррозию.

Заметим, кстати, что до войны потери от коррозии были бóльшими: тогда, по тем же подсчетам, ежегодно гибло до 40 процентов мировой продукции металла — так что прогресс в борьбе с коррозией налицо.

Поскольку коррозия в основном сугубо электрохимическое явление, то и лекарства от нее должна дать электрохимия. И она дает их. Мы пока не можем «научить» обычную конструкционную сталь бороться с коррозией (нержавейка не в счет — слишком дорого!). В споре

с влагой и кислородом металл всегда проигрывает. Но не допустить к металлу влагу и кислород в наших силах. Для этого наиболее «уязвимые» детали покрываются тончайшей блестящей пленкой хрома или никеля, которые и сами практически не ржавеют и защищают металл от коррозии.

Но отчего защитная пленка всегда так красиво блестит? Только ли из эстетических соображений? Нет. Раньше покрытия делали матовыми. А потом наука доказала: блестящий металл в меньшей степени, чем матовый, подвержен коррозионному и механическому разрушению, дольше служит. Так что здесь польза и красота шагают, взявшись за руки.

Индустрия «блеска» включает сложнейшие технологические процессы: порой приходится электрохимически наносить на поверхность несколько слоев различных металлов, что приводит к цепочке из десятков последовательно проводимых операций...

А почему с коррозией надо только бороться? Нельзя ли привлечь ее на службу человеку? Разумеется, не саму ржавчину, а ту электрохимическую реакцию, которая так беспощадно «съедает» металл. Надо лишь научиться управлять ею, чтобы съедалось только то, что нужно и сколько нужно.

Так родилась электрохимическая размерная обработка (ЭХРО). В общих чертах суть метода такова. Представьте себе станок, где к детали подведен «плюс», а к инструменту «минус» постоянного тока. Между деталью и инструментом находится тонкий слой электролита (обычно им является раствор поваренной соли). Теперь достаточно пропустить ток, как металл под воздействием электролита начнет растворяться, и инструмент, похожий на пресс-форму, станет «выдавливать» деталь нужной формы.

Чтобы этот процесс был непрерывен, между инструментом и деталью оставляют зазор в несколько долей миллиметра. Через него под большим давлением пропускается раствор электролита, который не только поддерживает реакцию, но и выносит продукты растворения, одновременно охлаждая металл. И никакой тебе резки или других обычных механических операций. Роль резца играет электрическое поле. Задача, как у скульптора,— убрать все лишнее. Короткое время, и на ваших глазах возникает профиль детали. Отключаем ток, извлекаем

деталь из резервуара, снимаем с нее остатки электролита...

Еще достоинство ЭХРО: ей подвластны вязкие, хрупкие материалы, плохо поддающиеся механической обработке, а также изделия со сложным профилем — лопасти турбин, турбореактивные двигатели.

А как обработать металл, например вольфрам, который по твердости подчас не уступает алмазу? До недавнего времени подобные операции проводились механическим способом: час за часом алмазный резец «по крохам» точил сверхтвердые детали. Когда были созданы еще более твердые сплавы (сплавы с применением тантала, ниобия, титана), то эта операция в некоторых случаях стала вообще невозможной. И вот тогда-то сказала свое слово электрохимия.

Процесс ЭХРО выгодно зарекомендовал себя во многих отраслях промышленности: авиационной, автомобильной, машиностроительной. Это не удивительно, так как по скорости ЭХРО в 5—15 раз быстрее резания, а его себестоимость в 2—7 раз ниже...

НА ВСЕ РУКИ МАСТЕРИЦА

Повторим еще раз: электрохимию несомненно ждет большое будущее. Это можно доказать почти как математическую теорему.

Как заметил когда-то академик А. Н. Несмеянов, главные точки роста каждой современной науки — это места соприкосновения с другими областями знаний. Под этим углом зрения электрохимия имеет перспективы самые благоприятные: она вся соткана из «стыков».

Электрохимические процессы разыгрываются на границе, отделяющей металлический электрод от раствора электролита. Чтобы разобраться в происходящих здесь явлениях, необходимо оперировать понятиями квантовой механики, физики твердого тела, теории растворов... Такая особенность электрохимии (не очень понятно, как назвать ее: комплексность, что ли) позволяет ей «притягивать» к себе массу наук — физику, химию, биологию, материаловедение... И дает ей возможность вторгаться в самые неожиданные области: в зубоврачебное дело, в производство грампластинок, бурение нефтяных скважин.

Тут уже проявляется другая черта электрохимии — ее ярко выраженный прикладной характер.

В. Оствальд в книге «История электрохимии» (1911) писал: «Всякая наука черпает свои права на существование в возможности так или иначе оказаться полезной человечеству в качестве науки прикладной...»

Современные электрохимики свято чтут эти заветы, не потому ли так стремительно развивается электрохимия в последние десятилетия. Уже сейчас электрохимия готова принять участие в решении самых животрепещущих проблем современности. Например, электрохимическими способами можно хорошо опреснять морскую воду.

Еще английская королева Елизавета (XVI век) издала указ: в нем устанавливалась премия в 10 тысяч фунтов стерлингов за создание эффективного и дешевого метода опреснения морской воды. А сейчас проблема эта становится всемирной. Ресурсы пресной воды на планете истощены. По оценкам экспертов, через 10—15 лет бутылка чистой воды будет стоить, например, в ФРГ, дороже, чем стоит сегодня бутылка вина.

Воды на нашей планете много — в океанах и морях. Но в литре ее содержится в среднем 34 грамма солей, а воду считают питьевой, если концентрация солей не более одного-двух граммов на литр.

Электрохимия предложила такой способ опреснения: электрический ток, рассортировывая содержащиеся в морской воде ионы (положительные направо, отрицательные налево), оставит в аппарате дистиллят любой степени чистоты...

Точно так же можно очищать и пресную воду от загрязнения. Эта беда сейчас тоже выходит на первый план. Подсчитано, например: озеро Мичиган загрязнено настолько, что для его самоочистки понадобилось бы 500 лет.

Воду можно очищать разными способами, но лишь электрохимия дает возможность придавать воде ряд замечательных свойств. Так, к примеру, созданы уже электрохимические устройства для получения целебной «серебряной» воды, насыщенной ионами серебра, убивающими микробов.

Из истории известно: офицеры в армии персидского царя Кира употребляли болотную воду без каких-либо последствий, а солдаты мучились от желудочных болез-

ней: первые пользовались серебряными кубками, вторые оловянными.

Доказано: миллиграмма серебра в литре воды достаточно, чтобы убить там практически всех микробов. Лекарства, изготовленные на «серебряной» воде, сохраняются значительно дольше, чем на простой. Такую воду можно использовать для консервации пищи — молока, масла, соков... Эту воду пьют советские космонавты во время полетов над планетой.

Сегодня человек начинает ощущать нехватку пресной воды, а завтра, глядишь, будут затруднения с кислородом воздуха, жадно поглощаемого различными промышленными установками. И тут на помощь может прийти электрохимия. Электролиз воды, дающий водород и кислород, мог бы вернуть атмосфере ее живительные свойства...

В этой главе, возможно, слишком часто мелькает слово «электролиз». Может показаться, что это — главный «козырь» электрохимии. Вовсе нет! Скажем несколько слов о связях электрохимии с химией.

Непростые отношения у этих наук. Если придирчиво пересмотреть возможности этих соперниц, быстро убеждаешься: электрическая химия может делать все то же, что и «просто химия». Да сверх того еще и многое другое.

Оно и понятно: ведь любая химическая реакция — это в конечном итоге перенос электронов от одних атомов и молекул к другим. Химии «неэлектрической» попросту не существует. И это еще одно из проявлений всемогущества электрохимии.

* * *

...Осень 1975 года. В Алма-Ате собрался XI Менделеевский съезд. На его заключительном пленарном заседании выступил и академик А. Н. Фрумкин. Это было последнее в его жизни выступление в большом научном собрании. Неожиданно для тех, кто его слушал, академик, взойдя на трибуну, заявил, что хотел бы сказать «слово о пользе электрохимии» (в официальной программе съезда название доклада звучало совсем иначе и довольно сухо).

В тот день Александр Наумович был в ударе. Красноречиво и броско спешил он, как бы предчувствуя близ-

кую кончину, раскрыть перед сидящими в зале химиками и электрохимиками те блестящие возможности, которые сулит электрохимия.

Свое выступление, лукаво полемизируя с нефтехимиками, Фрумкин, под бурные аплодисменты зала, закончил такими словами: «И в конце концов Афродита вышла не из нефти, а из пены морской, то есть из структурированного электролита...»

Глава 4,

о торжестве несгибаемой веры или о том, как рожденные на Земле топливные элементы первое применение нашли в космосе

Топливные элементы: с Земли на Луну

Из грязи да в князи
Русская поговорка

В 1842 году, спустя три года после создания первого топливного элемента, Гров сделал следующий важный шаг. Он сконструировал батарею из 50 отдельных топливных элементов и назвал ее «газовой вольтовой батареей». Описывая в очередной научной статье ее устройство, Гров утверждал, что удар током, который генерировала его батарея, могли бы почувствовать пять человек, взявшихся за руки. Смельчаку же одиночке пришлось бы плохо. Явный прогресс по сравнению с первым элементом, созданным в 1839 году, но все еще игрушка.

Как бы удивились Гров и его современники, если бы какие-то волхвы от науки явились бы и предрекли: «Придет день, и это устройство, то, над чем вы сейчас потешаетесь, побывает на Луне. И уже оттуда, спустившись на Землю, начнет свое победное шествие...» Волхвы (мы это теперь знаем) были бы абсолютно правы. Да только кто бы тогда им поверил? Все приняли бы подобные пророчества за совершеннейшую чепуху.

НОВЫЙ СТАРТ

Прошли 30-е годы нашего века. Время работало на топливные элементы. Техника требовала все новых и новых типов автономных электрохимических источников

тока — аккумуляторов для автомашин, электрокаров, подводных лодок... Только на усовершенствование свинцовых аккумуляторов к середине XX века были выданы многие тысячи патентов. Поэтому накануне второй мировой войны исследователи вновь обратились к простейшему топливному элементу — водородно-кислородному.

К этому времени трудность и размеры проблемы были уже понятны. Исследователи не отказались от идеи получения дешевой электроэнергии из природного топлива и кислорода воздуха, но стало ясно: кавалерийским набегом тут ничего не добьешься, для решения этой задачи нужны многие годы, а возможно, и десятилетия.

Поэтому практичнее было ориентироваться на наиболее разработанные к тому времени системы — ими оказались элементы типа Грова. В них, правда, сжигался не уголь, а довольно дорогой водород: для его получения требовалось много электроэнергии. Однако этот изъян окупается с лихвой, так как характеристики водородно-кислородных топливных элементов по ряду показателей превосходят характеристики самых совершенных аккумуляторов и гальванических элементов.

Начался новый штурм трудной проблемы.

Весомую лепту в разработку и создание таких топливных элементов внесли советские исследователи.

В 1935 году в советском журнале «Успехи химии», в послесловии к переведенному с немецкого языка обзору Баура, днепропетровский профессор (позже член-корреспондент Академии наук СССР) В. С. Финкельштейн отмечал, что «проблема топливных элементов... одна из самых заманчивых, самых блестящих проблем, которые должны быть выдвинуты в число первоочередных и разрешены советской наукой». Он указывал также, что в области топливных элементов все еще господствует слепой, стихийный подход. Поэтому профессор обращался к советским электрохимикам с призывом заняться большой теоретической работой, «чтобы вытянуть науку о топливном элементе из эпохи эмпиризма».

Старые журналы!.. Пожелтевшие, потрепанные страницы. Поля, помеченные чьим-то трудолюбивым карандашом — галочки, восклицательные знаки, возмущенные или восторженные реплики, ядовитые замечания. А сами журнальные статьи, этот конденсат былых научных страстей, интеллектуальных бурь, воплей неудовлетворенного честолюбия, амбиции, исступленной жажды истины...

Я держу в руках журнал с названием «Советская наука». Март 1941 года.

Этот журнал (так же, видимо, как и государственное издательство «Советская наука»), созданный в 1941, просуществовал лишь четыре месяца — началась война.

В мартовском номере опубликовано было постановление Совета Народных Комиссаров Союза ССР о присуждении государственных премий.

В разделе «За выдающиеся изобретения» премии третьей степени был среди прочих удостоен и Павел Маркович Спиридонов, научный сотрудник физико-химического института имени Л. Я. Карпова. Он изобрел новый тип элемента воздушной деполяризации — так говорилось в постановлении. Фактически же тут речь шла все о том же топливном элементе.

В СССР этими работами начали заниматься совсем недавно. Но успехи уже были. И немалые.

В Институте имени Л. Я. Карпова, в лаборатории академика Александра Наумовича Фрумкина (его выдающиеся труды по электрохимии также были в 1941 году отмечены Государственной премией первой степени), работала группа, называвшаяся так: «Новые источники тока». Руководил ею инженер П. М. Спиридонов.

Подробнее о достижениях этих исследователей мы расскажем в другой главе. Сейчас же отметим главное. Работы Спиридонова показывали реальную возможность практического использования топливных элементов (во всяком случае, водородно-кислородного варианта).

Элементы Спиридонова, созданные в 1939—1941 годах, имели значительную плотность тока —30 миллиампер с квадратного сантиметра поверхности электродов. Эти значения были для того времени довольно высокими (сейчас удается получать токи во много раз больше) и в противовес пессимистическим взглядам Баура показывали перспективность дальнейших изысканий в этом направлении.

Но началась война. Исследования с таким блестящим стартом были свернуты...

Примерно в те же годы, перед войной, подобными работами в СССР, хотя несколько в ином плане, занимался еще один наш соотечественник — Оганес Карапетович Давтян. В Энергетическом институте эти исследования велись под руководством академика Глеба Максимилиановича Кржижановского.

Давтян построил установку для электрохимического сжигания генераторного газа (газ, получаемый путем газификации твердого топлива). Она представляла собой кожух, в который подавался, с одной стороны, обыкновенный воздух, с другой — генераторный газ. Потоки воздуха и генераторного газа были разделены слоем твердого электролита. С каждого кубометра объема такого элемента Давтяну удалось получить до пяти киловатт мощности. Показатель, в пять раз превышающий тот, который характеризует современную тепловую электростанцию.

Кпд этого элемента был высок, но, к сожалению, через некоторое время твердый электролит изменял свой состав. И элементы делались непригодными...

Уже после войны, в 1947 году, эти работы были собраны Давтяном и опубликованы в первой посвященной топливному элементу монографии: она называлась «Проблема непосредственного превращения химической энергии топлива в электрическую».

Книга эта вызвала большой интерес не только у нас, но и за рубежом.

Она сыграла важную роль в развитии работ по топливным элементам.

ЗАКОЛДОВАННЫЙ КРУГ

В злоключениях топливного элемента бывало всякое — насмешки критиков (мол, крохотные токи), рекламные восторги, истовость изобретательского пыла и многое другое. Не было, кажется, только несокрушимой, все отметающей, все преодолевающей уверенности, крепкой веры в успех этого научно-изобретательского мероприятия.

Пришло и это. В лице английского инженера Фрэнсиса Т. Бэкона (отдаленный потомок знаменитого философа, родился в 1905 году), создателя первого уже реально работающего образца топливного элемента.

«Мне хочется еще раз подчеркнуть,— сказал он недавно,— что не логические рассуждения, а убежденность в правоте идеи топливного элемента руководила мной все эти годы...»

Эта цитата взята из речи Бэкона, произнесенной им 23 мая 1978 года на собрании Электрохимического общества в городе Сиэтле, что в штате Вашингтон (США).

Речь была произнесена по случаю награждения Бэкона медалью и наградой за успехи, достигнутые в разработке топливного элемента.

Выступление Бэкона (оно опубликовано в «Journal of Electrochemical Society») называлось «Топливные элементы: некоторые мысли и воспоминания».

Бэкон вспоминал, как он в 27-летнем возрасте занялся этой проблемой: «...Я подошел к делу как практик и был убежден еще в те ранние дни, что это как раз работа для меня. И я должен довести ее до той стадии, когда делом этим заинтересуются прикладники...»

Прежде всего Бэкон отверг платину, заменив ее дешевым катализатором — никелем. Малы токи? Повысим температуру, но лишь до сотен градусов. Чтобы при этом водный электролит не закипел, понадобятся высокие давления водорода и кислорода — тоже сотни атмосфер. «Ну что же, будучи инженером,— вспоминал Бэкон,— я боялся коррозии (она неизбежно съест элемент — при тысячах-то градусов! —*Ю. Ч.)* больше, чем сверхвысоких давлений: хотя работу при высоких давлениях многие презрительно называют «тактикой кувалды».

Было бы утомительно подробно цитировать все слова Бэкона, посему — да простит он нас! — будем кратко пересказывать лишь наиболее значительные для нашей истории моменты.

В 1939 году Бэкону — он работал тогда в Лондоне, в Королевском колледже — удалось создать водородно-кислородный топливный элемент с плотностью тока в 13 миллиампер с квадратного сантиметра, работавший при температуре 100 градусов по Цельсию и давлении 200 атмосфер. Этот элемент проработал всего 48 минут.

Мало? Конечно, ведь чтобы соревноваться, скажем, с двигателем внутреннего сгорания — а Бэкон только об этом и думал,— нужны были токи хотя бы в 100 миллиампер, то есть примерно на порядок большие. К тому же с достаточным ресурсом — сроком жизни элемента.

В этой напряженной и довольно проблематичной ситуации исследования на пять лет прервала война, но не таков был Бэкон, чтоб остыть. Не без юмора вспоминал он, как в послевоенные годы, желая во что бы то ни стало продолжить исследования, искал поддержки в различных организациях. Однажды ему довелось встретиться с двумя важными директорами не менее важной химической компании. Его спросили: «Где вы хотите

использовать топливный элемент?» Бэкон простосердечно отвечал: «Я возьму баллоны со сжатым водородом и кислородом, поставлю их в кузов автомобиля вместе со множеством топливных элементов — это приведет авто в движение...»

«Никогда не забуду того неистового взрыва хохота, которым были встречены мои слова... Аудиенция вскоре закончилась, безо всяких последствий...»

«Имел я также контакт с главой исследовательской организации, занимающейся топливами. Он спросил: знаю ли я химию? Я признался, что знаком лишь со школьным курсом... Слова мои были встречены с величайшим презрением...»

В конце концов Бэкон все же получил возможность продолжать дело на инженерно-химическом отделении Кембриджского университета (Англия).

Десять лет усилий дали уже неплохой результат: при давлении 27 атмосфер и температуре 200 градусов элемент Бэкона давал токи до 230 миллиампер и мог работать непрерывно много тысяч часов. В 1959 году Бэкон сконструировал и построил целую батарею из 40 топливных элементов общей мощностью в 6 киловатт, кпд 80 процентов.

Наконец-то (через 120 лет после открытия Грова) был создан работающий топливный элемент. Батарея Бэкона могла приводить в действие электрокар, циркулярную пилу, сварочный аппарат.

Все говорило за то, что топливные элементы вышли из стадии лабораторных исследований. Но где и как их использовать? И можно ли? И стоит ли?

Транспорт? Да, батарея Бэкона могла привести в движение небольшой автомобиль. По своим размерам батарея была примерно такой же, как и автомобильный двигатель (76×38×30 сантиметров). Однако общий вес установки вместе с баллонами газа и вспомогательным оборудованием (автоматика, удаление воды — продукта реакции, поддержание стабильной температуры), необходимым для управления работой батареи, составлял около 300 килограммов, для ее размещения потребовался бы грузовик. Таким образом, общее соотношение мощности к весу у детища Бэкона оказалось все же слишком низким, чтобы его можно было, скажем, использовать на транспорте.

Может быть, энергетика? К стационарным генераторам, предназначенным для электрических станций, не предъявляются такие жесткие требования в отношении веса и компактности. Но поскольку они должны вырабатывать много энергии, в них должно использоваться доступное, дешевое (например, горючие газы) топливо. А батарея Бэкона эффективно работала только на водороде, степень чистоты которого равнялась 99,5 процента. Столь чистый водород и стоил крайне дорого, и производство его было ограничено (тогда еще о водородной энергетике и слыхом не слыхали).

Металлы-катализаторы, использованные в элементе Бэкона, были крайне чувствительны к малейшим загрязнениям как топлива (водород), так и окислителя (кислород). Примеси выводили их из строя.

А ведь в идеале (вспомним Оствальда) грезилось, что топливные элементы будут способны работать на кислороде воздуха (без разделения газов) и на неочищенных углеродистых продуктах.

Вот и образовался заколдованный круг. И выхода, казалось бы, не было никакого. Практическое использование топливного элемента вновь откладывалось на неопределенный срок.

КОНКУРС ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ

Оставив за собой гигантский огненный хвост, космический корабль устремился ввысь. Вот отделяется ракета-носитель, и космонавты берут курс на цель — Марс? Венеру?..

Представим теперь себе, читатель, что мы находимся в кабине космического корабля. Первое, что нам бросилось бы в глаза,— это, видимо, мягко светящийся главный пульт управления: светло-серая приборная доска, полумесяцем огибающая всю кабину, со множеством различных переключателей, датчиков, счетчиков, циферблатов, шкал, индикаторов и других приборов. Даже стены космической каюты усеяны сотнями разных переключателей и кнопок.

Сложное хозяйство у космонавтов. Необходимо собирать и передавать на Землю разнообразные данные. Должны быть на борту также устройства, поддерживающие в кабине тепло и уют, хотя снаружи температура может колебаться от плюс 120 до минус 150 градусов Цельсия.

И вся эта орава приборов — радиоприемное и радиопередающее оборудование, приборы для научных исследований и экспериментов, контроля параметров самого корабля, бортовая ЭВМ и так далее — требует электроэнергии. Где ее взять? Какой тип бортового источника энергии выбрать?

Непростые вопросы! Элементарные оценки показывают: чем длительнее полет, тем (если ориентироваться, скажем, на обыкновенное химическое топливо) больший запас «горючего» должны брать с собой космонавты.

Для полета к Марсу бортовые источники электрического питания потребовали бы 200 тонн (!) ракетного топлива.

Когда 4 октября 1957 года был запущен первый советский спутник, более 38 процентов его общего веса составили химические источники тока. И все ж этих запасов хватило только на три недели.

Для маленьких спутников, весящих сотни граммов, требовались ватты энергии. Космические же корабли с человеком на борту нуждаются в гораздо большем — в киловаттах. А обитаемые космические станции требуют десятки и сотни киловатт. Где ее черпать?

Первый, вполне доступный, надежный и неисчерпаемый источник ее — Солнце. Правда, тут есть одно «но»: плотность солнечной радиации очень низка. Как известно, солнечный свет не зажжет даже спички, если его предварительно не сфокусировать. Тем не менее этот источник считается безусловно перспективным, и для его использования разрабатываются (или уже практически разработаны) различные устройства: гелиоустановки, в которых путем концентрации повышается плотность солнечной радиации, полупроводниковые фотоэлектрические генераторы (солнечные батареи), пригодные как раз для автономного энергопитания космических летальных аппаратов.

Кпд фотоэлементов пока еще не слишком велик — что-то около 10 процентов. Чтобы получить достаточную для космического аппарата энергию, надо фотоэлементами покрыть значительную поверхность.

Кроме того, солнечные батареи работают в трудных условиях и потому довольно быстро разрушаются.

Космические пылинки — крошечные метеориты, словно мыши, грызут поверхность солнечных батарей, ее также портят безжалостные потоки космической радиации.

Учтем также, что солнечные батареи должны быть постоянно в нужном направлении ориентированы на Солнце, а это требует дополнительных расходов энергии...

Солнечные батареи, конечно, не единственный источник электричества для космического корабля. Обсуждаются проекты и радиоизотопных, и ядерных энергоустановок. Однако при их использовании экипаж необходимо защитить от радиации. А это значит — толстые, тяжелые защитные стенки. Поэтому для коротких полетов, какие человек предпринимал до сих пор, эти источники энергии непригодны.

Можно также поставить на космический корабль (есть и такие проекты) термоэлектрические или термоионные преобразователи: они непосредственно преобразуют тепло в электрический ток. Но кпд их невелик, и требуют они высокотемпературной зоны — 700—1200 градусов Цельсия. А это уже сложная техническая задача; для рассеивания избыточного тепла необходимы специальные радиаторы и многое иное.

Этот список конкурентов можно было бы продолжить, но мы не будем этого делать. Добавим только, что основные показатели при выборе энергетической установки для космического корабля — ее масса и объем. Они, естественно, должны быть (в расчете на единицу мощности) минимальными. Какая же энергоустановка будет удовлетворять этому требованию? Это зависит прежде всего от необходимой мощности источника и продолжительности работы во время полета.

Сравнительный анализ и расчеты показывают, что каждый из рассматриваемых источников имеет свою область применения. Если же говорить о топливных элементах, то их наиболее выгодно использовать при полетах от нескольких дней до нескольких недель и когда нужна не очень большая мощность — примерно до 10 киловатт.

Когда в США встал вопрос о выборе энергоустановки для космических кораблей «Джемини» — они должны были вращаться вокруг Земли в течение двух недель,— все решили сравнительно простые оценки.

Космический полет требовал 200 киловатт-часов электроэнергии. Чтобы ее обеспечить, самая совершенная батарея аккумуляторов — серебряно-цинковых — должна была весить 1,5 тонны при объеме 0,5 кубического метра. Батарея солнечных элементов — 335 килограммов и объем 1,12 кубического метра, а вот энергоустановка из во-

дородно-кислородных топливных элементов имела расчетный вес лишь 225 килограммов и объем 0,45 кубического метра.

Эти цифры (в космосе каждый килограмм и каждый кубометр на учете) и склонили чашу весов в пользу топливных элементов.

Конечно, топливные элементы имели в космосе и другие преимущества. В отличие от солнечных батарей они вырабатывают электроэнергию в любое время суток, независимо от освещенности. Топливные элементы компактны, могут иметь любую геометрическую конфигурацию в соответствии с требованиями космического аппарата. Они нечувствительны к ударам, вибрации, радиации, выдерживают кратковременные перегрузки до 100 процентов номинальной мощности, не имеют вредных выбросов (вселенная космической кабины очень мала: ее нельзя загрязнять!), бесшумны, не дают радиопомех и вредных излучений, действуют при температурах, близких к комнатной...

Вот так и получилось, что первое практическое применение топливные элементы нашли не на Земле, а в космосе. Жалкая пария на Земле, топливный элемент расцвел в космосе. Там его достоинства засверкали яркими красками.

Наконец-то для топливных элементов наступили славные времена. (Ведь мы помним, каким чрезвычайно сложным оказалось становление этих устройств, растянувшееся на столетие.) А все потому, что в них появилась настоятельная нужда.

В 1963—1964 годах только в США на исследования по топливным элементам ежегодно шли десятки миллионов долларов. И такие исследования велись во всех развитых странах мира.

Ведь одно дело — создать остроумное устройство, действующее ограниченное время в лабораторных условиях, и совсем другое — построить надежный генератор электрического тока, какого прежде и видано не было и который бы не подвел космонавтов, обеспечил им успех.

В середине 60-х годов в США проблемой топливного элемента занималось около 60 организаций. Например, в крупной американской промышленной фирме «Пратт — Уитни», работавшей тогда на космос, над созданием электрохимических генераторов (так еще называют топливные элементы, если их рассматривать вкупе с автома-

тикой, системами отвода тепла, продуктов химических реакций и прочими вещами, неизбежными, если речь идет о мощных автономных источниках энергии),— над ЭХГ трудилось около тысячи ученых и инженеров. Для изготовления топливных элементов эта фирма располагала специальным заводом площадью в 16 тысяч квадратных метров. А за участие в проекте «Аполлон» фирма получила от НАСА 100 миллионов долларов.

Невольно приходит на память время, когда над решением этой проблемы бились в одиночку, как, например, наш Яблочков.

В ЛЕС — СО СВОИМИ ДРОВАМИ?

Парадокс — сработанные только вчера и вчерне, еще не оперившиеся, не окрепшие (да что там — просто откровенно слабые), не обстрелянные, словно новобранцы перед сражением, топливные элементы должны были использоваться в космической технике, где к любой аппаратуре предъявляются сверхжесткие требования.

Первая очевидная трудность здесь — с нее начнем: в космос, кроме самой батареи топливных элементов, необходимо брать еще и топливо. Значит, дополнительная тяжкая ноша, которую надо забросить за пределы земной атмосферы.

В лес — со своими дровами? Да, пришлось на это пойти, хотя космос — в этом нет сомнений — обладает бессметными энергетическими сокровищами.

Но и этого мало: космический корабль необходимо было загрузить не только запасом топлива — водорода, но и окислителя — кислорода. Им пришлось бы снабдить и тепловую машину, если бы ее отправили в космос, поскольку только в земных условиях двигатели внутреннего сгорания и им подобные устройства в качестве окислителя используют даровой кислород воздуха.

А теперь займемся подсчетами. Спросим себя, велик ли расход топлива и окислителя при работе топливных элементов? И сколько их нужно взять в космос?

Ответ получить несложно. Прежде всего вспомним (школьные истины), что количество граммов вещества, численно равное атомному или молекулярному весу, называется соответственно грамм-атомом или грамм-молекулой и содержит $6 \cdot 10^{23}$ атомов или молекул.

В топливном элементе водород, каждый его атом, превращаясь в ион, посылает во внешнюю цепь один электрон. Поэтому, когда прореагирует 1 грамм водорода (грамм-атом!), по цепи пройдет ровно $6 \cdot 10^{23}$ электронов, что эквивалентно 96 500 ампер-секундам (кулонам) или 26,8 ампер-часам. Такое количество электричества в честь Фарадея названо фарадеем и обозначается символом F.

Это события на водородном электроде. На кислородном же (в водородно-кислородном топливном элементе) каждая молекула кислорода захватывает 4 электрона. Поэтому для получения 1F электричества нужно затратить $^1/_4$ моля кислорода, или, что то же, восемь граммов. Расход кислорода по весу получился в восемь раз больше расхода водорода.

Если обобщить наши рассуждения, то можно сказать, что для получения одного фарадея электричества из любого вещества надо затратить в электрохимическом устройстве M/n граммов этого вещества, где M означает молекулярный вес вещества, а n — число электронов, участвующих в окислении или восстановлении одной молекулы.

Вернемся теперь к основному вопросу — оценим расход топлива и окислителя не на определенное количество электричества, а на определенное количество электрической энергии, например на 1 киловатт-час. Здесь вновь придется вспомнить элементарную физику.

Количество выработанной электроэнергии — это произведение количества электричества на напряжение источника. Поэтому расход активных веществ зависит еще и от рабочего напряжения элемента: чем оно выше при одном и том же токе, тем меньше удельный расход активных веществ.

Если водородно-кислородный топливный элемент будет работать при напряжении 1 вольт, расход водорода в нем составит 37,3 г/кВт·ч, а при напряжении 0,7 вольта — 53,3 г/кВт·ч. Расход кислорода, как мы уже отмечали всегда в 8 раз больше расхода водорода.

Проведя аккуратно подобные оценки, можно получить такой конечный результат. На 1 киловатт-час энергии в водородно-кислородном топливном элементе необходимо израсходовать около 0,5 килограмма горючего и окислителя. Таким образом, для энергоустановки космического корабля «Джемини», рассчитанной на выработку 200 киловатт-часов электроэнергии, необходимо было захватить в космос примерно 100 килограммов водорода и кис-

лорода. Если учесть, что расчетный вес установки оценивался специалистами в 225 килограммов, то, значит, половина этого веса приходилась на топливо и окислитель.

Это все теоретические оценки. А практика (технология) дела была такой. Газообразные водород и кислород заняли бы громадный объем, поэтому они хранились в особых отсеках космического корабля в жидком состоянии. А это — новая проблема. Чтобы сохранить сжиженные газы длительное время (двухнедельный полет) с очень незначительными потерями на испарение, потребовалось создать специальные емкости.

Еще тонкость. Перед подачей в топливные элементы водород и кислород необходимо было в нужной дозировке превратить из жидкого состояния в газообразное. Для этого газы подогревались в специальном теплообменнике, где греющей средой являлся циркулирующий теплоноситель. И нагреть нужно было до строго определенной температуры — рабочей температуры топливных элементов. До рабочего значения доводилось (с помощью редукторов) и давление газов. Иначе из-за некондиционной температуры и давления газов топливные элементы могли «впасть в шоковое состояние».

Но все эти меры — лишь малая толика тех технологических трудностей, которые пришлось преодолеть для того, чтобы послать топливные элементы в космос.

ПЕРВЕНЕЦ ДОСТАВИЛ МАССУ ХЛОПОТ

К космическим достижениям все уже привыкли. Вызвать сенсацию стало делом довольно трудным. Вот если бы космонавты улетели на Марс, отправились обследовать кольца Сатурна или спутники Юпитера, махнули к созвездию Большой Медведицы — это бы нас снова поразило.

Однако удивления достоин каждый даже самый «рядовой» полет в космос. Широкой публике просто неизвестно, какие технические преграды пришлось преодолеть, чтобы «заасфальтировать» дорогу в космическое пространство.

Косвенным мерилом этих технологических усилий может служить стоимость полетов. Любители статистики уже подсчитали, что каждая секунда пребывания на Луне экипажа «Аполлон-12» обошлась в 30 тысяч долларов (астронавты пробыли на Луне 2 часа 40 минут — 9600 секунд!).

Почему так дорого? На что ушли эти деньги? В основном на борьбу с *T*-, *P*- и *g*-нулями. Эту схватку человеческого гения с суровостью космоса мы проиллюстрируем на примере топливных элементов.

Космос отгородился от землян высочайшими барьерами. Из них главные три: температура, приближающаяся к абсолютному нулю, глубокий вакуум и невесомость. Эти барьеры специалисты называют *T*-, *P*- и *g*-нулями. Они означают, что человек в космосе должен научиться жить и работать при нулевой температуре, нулевом давлении и нулевой гравитации.

Для конструкторов и технологов, снаряжавших топливные элементы в космический полет, наибольшие неприятности доставил *g*-нуль.

Особенно строптиво в невесомости ведут себя жидкости. Они покидают предназначенные для них емкости, нарушая нормальное функционирование различных систем. В них не наблюдается обычная в земных условиях конвекция, что сильно затрудняет удаление пузырьков газа, случайно попавших в электролит. Ввиду всего этого в первом варианте топливных элементов, побывавших в космосе, было решено вовсе отказаться от жидкого электролита, заменить его на... твердый.

Такой чудо-электролит представляет собой пленку (мембрану) из твердого полимера, обладающего ионообменными свойствами. Получают такой полимер, например, полимеризацией стирола с дивинилбензолом и последующей обработкой серной кислотой образующегося продукта.

Полимер имеет трехмерную структуру. Если попытаться изобразить ее на плоскости, то получится такая картина:

SO_3H $\quad$ $-CH-CH_2-$

$-CH - CH_2 - CH - CH_2 - CH - CH_2 - CH - CH_2 - CH-$

SO_3H $\quad$ $-CH - CH_2 - CH - CH_2 - CH-$ $\quad$ SO_3H

SO_3H $\quad$ SO_3H

Проводниками тока в этом необычном электролите являются ионы водорода: они отщепляются от сульфогрупп SO_3H при пропитке полимера водой. Сульфогруппы заряжаются отрицательно, но они жестко привязаны к каркасу полимера, перемещаться не могут, а потому и не участвуют в переносе тока. Ток проводят только положительно заряженные ионы водорода, они движутся в воде, заполняющей пустоты в полимере.

Конечно, достоинство твердого электролита частично подрывается тем, что сопротивление полимера превосходит сопротивление жидкого раствора электролита. Поэтому разделяющую водородный и кислородный электроды полимерную мембрану старались сделать как можно тоньше, чтобы уменьшить омические потери в каждом отдельном элементе.

Следующей проблемой, где невесомость вновь заявила о себе, стала проблема отвода образующейся в топливном элементе воды. Если ее не удалять, она покроет электрод пленкой и затруднит к нему доступ для газа.

Растворимость ($c_0 \sim 10^{-6}$ моль/см^3) и коэффициент диффузии ($D \sim 10^{-5}$ см^2/с) газа в воде ничтожны, поэтому характеристики элемента при его «затоплении» могут резко снизиться. Но в то же время вода необходима мембране, которая хотя и слабо впитывает ее, однако сухой быть не должна.

Требовалась тонкая балансировка между крайностями. Ее решили так. Вода удалялась путем испарения с кислородного электрода за счет тепла, выделяющегося при работе топливного элемента, и конденсировалась на токоотводе, который охлаждался специальным теплоносителем, циркулирующим по трубкам, прикрепленным к токоотводу.

Но и здесь опять пришлось бороться с невесомостью. В космосе конденсирующаяся вода не может стекать. Вот и пришлось ее удалять с помощью системы фитилей, буквально высасывающих воду.

Если невесомость проявляет свои коварства явно, то влияние T- и P-нулей сказывалось косвенно. Возьмем, к примеру, проблему отвода образующегося в топливных элементах тепла. Ведь кабину космического корабля — этот искусственно созданный островок жизни в мертвящем космическом океане — нельзя перегревать.

Система охлаждения энергетической установки, естественно, была включена в общую систему терморегули-

рования кабины. Теплоноситель (циркулировать его заставлял особый насос) отводил выделяющееся в топливных элементах тепло к холодильнику-излучателю, который и сбрасывал это тепло в окружающее пространство.

Во время пиковых нагрузок, когда разогрев был особенно силен, в дополнение к холодильнику-излучателю включается еще и теплообменник с водяным испарителем. Когда температура превышала допустимую, температурный датчик открывал клапан теплообменника. Давление резко падало, вода в теплообменнике мгновенно вскипала, и избыток тепла отводился испарением.

Мы не в состоянии перечислить все технические тонкости и детали *. Ведь энергоустановка современного космического корабля представляет собой очень сложную систему, к тому же еще и связанную с остальными системами корабля. Ее основные узлы таковы: батарея топливных элементов, система хранения и подачи водорода и кислорода, система удаления продуктов реакции (в данном случае воды), система охлаждения — сложное хозяйство!

Потребление энергии на космическом корабле резко колеблется, что создает дополнительные трудности для стабильного отвода воды и тепла, образующихся в топливных элементах. Справиться со всем этим помогла автоматика.

Еще одна забота для конструкторов — обеспечение надежности работы энергетической установки. Батарея была изготовлена в виде двух отдельных секций, каждая из которых могла работать независимо одна от другой. В свою очередь каждая секция была составлена из трех блоков, включенных параллельно, что также повышало надежность работы секции в случае отказа одного из блоков.

Принцип дублирования проявлял себя и в других узлах энергетической установки. Так, циркуляцию теплоносителя обеспечивали два насоса — основной и резервный.

Проблема надежности заставила американскую фирму «Дженерал электрик» (она создала первые батареи

* Массу подробностей можно найти в популярной книге В. Ш. Паланкера «Холодное горение» (М., Наука, 1972), где представлены и объяснены схемы всех батарей топливных элементов, побывавших в космосе. Часть данных почерпнута нами из этой книги.

топливных элементов для космоса) запустить в 1964 году поточную линию для сборки топливных элементов. Из многих образцов отбирались лучшие. Но и они проходили в многочисленных испытаниях строжайшую проверку.

Первые испытания топливных элементов в космическом полете проведены были на корабле «Джемини-2», на котором в январе 1965 года выполнялся кратковременный суборбитальный полет без экипажа. А в условиях длительного орбитального полета топливные элементы проверялись (космонавтами Гордоном Купером и Чарльзом Конрадом) на корабле «Джемини-5» в августе 1965 года.

В основном топливные элементы справились с задачей. Однако вследствие недоработок в системе подогрева топлива в баках и в системе отвода воды космонавты вынуждены были — первенец доставил массу волнений и хлопот! — несколько раз резко ограничивать расход электроэнергии.

Еще более длительной была работа топливных элементов во время полета корабля «Джемини-7» в декабре 1965 года. 14 суток питали они электроэнергией все системы корабля, хотя и тут были отмечены некоторые неполадки.

КАПРИЗ ФОРТУНЫ

Первыми в космосе оказались топливные элементы с твердым полимерным электролитом. Там же выявились и их существенные недостатки. Для полетов на Луну — тут потребовались установки более мощные — они явно не годились: твердый электролит успешно работал лишь при температурах, не превышающих 60 градусов по Цельсию: при более высоких температурах полимер просто плавился. И это сильно усложняло организацию отвода тепла.

При малом перепаде температур нужна большая поверхность теплоотдачи, из-за чего система становится слишком громоздкой, и большая скорость циркуляции теплоносителя. В итоге все это приводит к большим затратам энергии на перекачку газов и жидкостей. Поэтому необходимо было разработать топливные элементы с более высокой рабочей температурой.

И вот — каприз фортуны! — на Луну отправились водородно-кислородные топливные элементы, которые создал Ф. Бэкон.

Мы помним, что к 1959 году Бэкон разработал первый вполне работоспособный вариант. Однако он имел еще массу недостатков. Тут даже многотерпеливый и сверхнастойчивый Бэкон, не имевший к тому же конкретных заказчиков, вынужден был в конце концов свернуть работу. Но в этот тяжелый для него момент патенты Бэкона купила американская фирма «Пратт — Уитни». Купила, чтобы, основываясь на технических достижениях Бэкона, приступить к разработке энергетической установки для космических кораблей «Аполлон», создававшихся для полетов на Луну.

Специалистам фирмы удалось коренным образом модернизировать элементы Бэкона, вдохнуть в них новую жизнь. Прежде всего щелочной электролит, представлявший собой 30-процентный раствор едкого кали, исследователи заменили 85-процентным, что позволило резко снизить рабочее давление в газах до нескольких атмосфер. Очень много было сделано и для улучшения электрохимических характеристик и конструкции электродов и элементов.

Мы не будем входить тут в подробности. Помянем лишь, что при нормальной рабочей плотности тока напряжение на одном элементе удалось держать в пределах 0,9—1,0 вольта, что соответствовало коэффициенту полезного действия 60—67 процентов. Это было большим преимуществом бэконовских элементов по сравнению с элементами с ионообменными мембранами, которые стояли на «Джемини»: их кпд был примерно 50 процентов. Ясно, что при большем коэффициенте полезного действия требуется меньше водорода и кислорода, что в конечном счете обеспечивает выигрыш в весе всей установки при длительной работе.

Большое внимание, конечно, было уделено и проблеме надежности. Инженеры так собрали батарею, что любой ее элемент можно было при желании легко вставить в батарею и изъять из нее в случае неисправности.

Батарея топливных элементов на космических кораблях «Аполлон» состояла из трех независимых секций, причем для нормальной работы было достаточно мощности двух секций, каждая из которых весила примерно 120 килограммов. В каждой секции последовательно соединялся 31 элемент, секция работала с мощностью 560—1420 ватт. При кратковременной нагрузке можно было отбирать до 2,3 киловатта мощности.

В энергосистему кораблей «Аполлон» входили также аккумуляторные батареи для обеспечения электроэнергией основных систем в аварийных ситуациях. Вся энергоустановка, рассчитанная на работу в течение 15 суток, весила 800 килограммов.

Видимо, детище Бэкона, к его немалому удивлению, не только вытянуло «счастливый билет», но и довольно успешно справилось с труднейшими задачами. Энергоустановки в космосе работали вполне нормально. Они обеспечили выполнение основной цели программы «Аполлон» — космические корабли «Аполлон-11» и «Аполлон-12» доставили космонавтов на Луну и возвратили их на Землю.

Правда, при полете корабля «Аполлон-13» произошла авария в кислородных баках системы энергоснабжения, но космонавты с помощью аккумуляторных резервных батарей благополучно возвратились на Землю.

ЛУННАЯ «ГАЗИРОВКА»

Топливные элементы добрались до Луны в июле 1969 года.

Теперь, 15 лет спустя, это событие уже кажется далекой историей.

В литературе о нем много писали, но меньше всего о топливных элементах, исправно и честно послужившим космическому делу. Оно и понятно: слова «топливный элемент» были тогда людям совершенно незнакомы.

А ведь рассказать было о чем. Например, о том, что космонавты на Луне пили воду, которую им поставляли водородно-кислородные топливные элементы.

Да, они не только снабжали космические экипажи электроэнергией, но и буквально поили их. И в этом был большой резон.

При работе водородно-кислородного топливного элемента (мы уже не раз упоминали это) в качестве продукта реакции выделяется вода — вещество, дешевое на Земле, но не в космосе.

Ежедневно космонавту требуется примерно от 4 до 13 литров воды — в зависимости от условий и срока полета. Эту потребность могут обеспечить водородно-кислородные топливные элементы, так как в них при выработке киловатт-часа электроэнергии в качестве

побочного продукта выделяется 0,35—0,45 литра чистейшей воды.

Нетрудно подсчитать, что при месячном полете космического экипажа экономия массы корабля за счет запасов воды будет исчисляться тоннами.

Вода образуется в топливных элементах на водородном электроде. Как ее удалить, одновременно сохранив для нужд космонавтов,— конструкторы поломали над этим голову. Был разработан оригинальный подход, существенно отличающийся от варианта отвода воды в элементах с пластмассовой мембраной.

Было решено удалять воду потоком циркулирующего газообразного топлива — водорода. Одновременно водород выполнял и роль теплоносителя, охлаждая батарею.

Дело обстояло таким образом. Водород, выйдя из батареи топливных элементов, проходил через промежуточный теплообменник и конденсатор. При этом большая часть водяного пара конденсировалась, и вода направлялась в сепаратор, где центробежный насос отделял ее от газа. Затем очищенная вода поступала в систему хранения, где ею могли пользоваться космонавты. Водород же вновь возращался в батарею для повторения цикла.

Астронавты Армстронг, Олдрин и Коллинз пили воду, которая синтезировалась в топливных элементах корабля «Аполлон». В отсеке «Аполлона-11» космонавты могли брать воду из трех кранов, в лунной кабине из одного.

Правда, на первых порах американские астронавты испытывали некоторое неудобство. Вода напоминала газировку: только вместо углекислого газа она была насыщена водородом. Это вызывало необычные и малоприятные ощущения.

Причина этого явления проста. Ведь вода (мы это уже отмечали) выделяется — испаряется — с той стороны, где происходит подача в элемент водорода. Естественно, пары воды смешивались с газообразным водородом.

Но в дальнейшем удалось получить воду без растворенного в ней водорода. Для улавливания в питьевой воде пузырьков газа на краны надевались специальные фильтры...

ТРУДЫ БЫЛИ НЕ НАПРАСНЫ

Топливные элементы на кораблях «Аполлон» служили вполне надежно, однако специалисты и у них видели слабые места.

Серьезный недостаток элементов бэконовского типа — довольно длительное время их запуска, что связано с необходимостью предварительного разогрева электролита. Хотелось также еще больше снизить вес батареи топливных элементов, увеличить продолжительность их работы. Поэтому были начаты исследования еще одного, третьего, типа водородно-кислородных топливных элементов с капиллярной мембраной.

Этот вариант как бы вобрал в себя достоинства первых двух типов. Отличие от элементов с ионообменными мембранами в том, что теперь мембрана сама неэлектропроводна и газопроницаема. И только после пропитки жидким электролитом (как и в бэконовских образцах электролитом служил раствор щелочи в воде) капиллярная мембрана может выполнять ту же роль, что и ионообменная мембрана,— роль квазитвердого электролита. Наилучшим материалом для нового типа мембран оказался тонкопористый асбест.

Капиллярная мембрана прекрасно работает в условиях невесомости. Электролит перемещается в ней главным образом за счет капиллярных сил, поэтому работа элемента не зависит от силы тяжести.

Топливные элементы с асбестовой капиллярной мембраной разработала в США фирма «Аллис—Чалмерс». Ее сотрудники выдвинули ряд интересных идей по улучшению работы топливных элементов.

Так, к примеру, предложен оригинальный метод удаления воды. За водородным электродом поставили еще одну асбестовую диафрагму, названную водотранспортной мембраной. Ее пропитывают щелочью более высокой концентрации, чем щелочь для электролитной (основной) мембраны. В результате образующаяся вода испаряется с водородного электрода и попадает на водотранспортную мембрану, так как давление водяных паров над более концентрированной щелочью (физике это давно известно) ниже.

Вода постепенно снижает концентрацию щелочи во вспомогательной мембране. Однако этот процесс длится только до определенного предела: в нужный момент за водотранспортной мембраной открывается клапан и лишняя вода испаряется в вакуум, который в космосе, как говорится, всегда под рукой.

Была решена и проблема тепловыделения. Тепло отводилось излучением. Температура в батарее регулиро-

валась специальным механизмом, который открывал и закрывал жалюзи: так изменялись размеры излучающей поверхности, а с ними и количество сбрасываемого в космос тепла.

Топливные элементы с капиллярной мембраной не уступали бэконовским по коэффициенту полезного действия, при этом были легче и, что особенно важно, могли стабильно работать очень долгое время. Лишь спустя 4500 часов (полгода!) при длительных испытаниях элементов наблюдалось небольшое падение мощности.

Все эти труды исследователей, технологов, конструкторов (отработка разных типов топливных элементов) были не напрасны, а многолетнее опробование и совершенствование топливных элементов явно пошло им на пользу.

Удельная масса топливных элементов для программы «Аполлон» составила 40,4 килограмма на киловатт, а вот для программы «Orbiter» она уже снизилась до 3,63 килограмма на киловатт. На усовершенствованных облегченных образцах надеются получить даже 1,82 килограмма на киловат.

Значительно снижена и удельная стоимость топливных элементов, которая составила в 1964 году примерно 225 долларов за киловатт («Аполлон»), 60 долларов для демонстрационного образца по программе «Shuttle» (1974) и 20 долларов для программы «Orbiter» (1977). Стоимость облегченных топливных элементов ожидается в будущем еще более низкой приблизительно на порядок...

Итак, в космосе топливный элемент нашел себе первое настоящее дело. И это сыграло важную роль: конструкция его непрерывно улучшалась. Можно сказать, что в космосе топливный элемент «окреп и возмужал». Теперь ему предстояло спуститься с небес на Землю, чтобы и здесь продемонстрировать все свои замечательные качества.

Глава 5,

здесь раскрыт главный секрет успеха топливных элементов. Путевку в космос им дали пористые электроды

Тропами лилипутов

Самое прекрасное, что мы можем испытать,— это ощущение тайны. Она-то и есть источник всякого подлинного искусства и всей науки. Тот, кто никогда не испытывал этого чувства, тот, кто не умеет остановиться и задуматься, охваченный робким восторгом, тот подобен мертвому и глаза его закрыты.

Альберт Эйнштейн

У. Гров и десятки других ученых и изобретателей, известных и безвестных,— все они настойчиво пытались вдохнуть жизнь в топливные элементы — такое, казалось бы, заманчивое техническое устройство. И все же «младенец» едва дышал.

Беда в том, что уж очень вяло протекало электрохимическое горение топлива. Образующиеся при этом токи были смехотворно малы. Могли произвести впечатление только на профанов. У серьезных же людей (особенно у энергетиков) топливные элементы вызывали лишь насмешки: куда им конкурировать с динамо-машиной, да просто с обычным горением березовых дров.

Отчего малы токи? Что происходит на границе «электрод—электролит»? Ответить исчерпывающе на эти вопросы должна электрохимия. Наиболее важный ее раздел, а именно кинетика электродных процессов, призван определить скорость электрохимических реакций, их, так сказать, силу. Может быть, тут и спрятан «золотой ключик» проблемы топливных элементов?

«Знание законов скоростей реакции имеет громадное значение для техники, так как только при таком знании возможно систематически управлять применяемыми процессами, которые в конце концов все протекают во времени. Особенно важно это для медленных реакций, чтобы там, где это возможно, ускорить их течение, потому что время — деньги в химической промышленности».

Так писал в 1907 году В. Оствальд, глашатай проблемы топливных элементов.

Да, для электрохимических превращений время — важный фактор. Приведем такой пример. Если в водородно-кислородном топливном элементе водородный электрод сделать из свинца, то для сжигания одного кубического сантиметра водорода потребовалось бы ни много ни мало десятки тысяч лет!

В тех же условиях на платиновом электроде кубик газа расходуется всего за час. Вот как важно правильно подобрать условия для электрохимических реакций.

Практика показала: не каждое сочетание двух электродов и электролита дает обильный ток. Поэтому совершенно безнадежно без науки искать оптимальные комбинации: пришлось бы, как это было прежде, вслепую испытывать многие тысячи вариантов.

Но, допустим, мы нашли удачные сочетания — исчерпана ли проблема? Нет. Даже если мы возьмем самые лучшие из катализаторов.

Вот платина — этот признанный чемпион катализа. Она успешно применяется в химической промышленности, в таких, к примеру, многотоннажных производствах, как окисление аммиака в азотную кислоту, при риформинге нефти и т. д. *

Один из организаторов советской платиновой промышленности — профессор О. Е. Звягинцев говорил, что платина для современной техники то же, что и соль для пищи: нужно немного, но обеда без нее не сваришь. И в самом деле: ежегодно в мире добывается всего несколько тонн платины, а требуется она всюду.

Платины мало, и все же давайте сделаем электроды топливных элементов из платины (или других дорогих и редких катализаторов),— решит ли это проблему? Увы, нет. Ведь с квадратного сантиметра платины при сжигании водорода удается снять токи порядка миллиампера. Техника же требует токи в тысячи раз большие. Только обладая такими характеристиками, «холодное» горение может конкурировать с обычным сжиганием топлива.

---

* В 1982 году издательство «Знание» выпустило книгу А. А. Локермана «Рассказ о самых стойких». В ней подробно излагается история открытия и технического освоения платины, рассказывается о той огромной роли, которую играют платина и платиноиды в промышленности.

И нечему тут удивляться: эти черепашьи скорости процессов легко объяснить. Суть элементарного электрохимического акта в том, что находящийся в растворе электролита ион, скажем анион, отдает металлическому электроду один (или несколько) своих электронов.

А какая у электрона масса? Порядка 10^{-27} грамма. Заряд? $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кулона. Чего ждать от такой электрической крохи?

Технике нужны амперы? Значит, электроды (если из платины) топливного элемента должны быть по крайней мере многометровых размеров.

Платина дорога? Возьмем более дешевый никель; в рублях выиграли, но проиграли в скорости электрохимических превращений: теперь уже, чтобы получить тот же ампер, надо сооружать электроды площадью в сотни и даже тысячи квадратных метров.

Но такое техническое чудовище, конечно же, не оправдает потраченных на него усилий: игра не стоит свеч.

И все же эту, казалось бы, неразрешимую проблему удалось решить. С помощью специально изготовленных электродов — пористых.

Но прежде одно литературное отступление. Вспомним... Гулливера. Тот эпизод, когда его перевозили в столицу. 500 плотников построили по приказу императора огромную (по понятиям лилипутов!) телегу на 22 колесах. Чтобы водрузить на нее Гулливера, 900 отборных силачей были собраны со всех концов Лилипутии. 1500 самых крупных лошадей.

Лилипуты применили принцип: из малого — большое. Принцип, необычайно выгодный при решении целого ряда технических задач. Например: как вогнать громадную поверхность в малый объем? Эта задача и встала перед теми, кто занимался топливными элементами.

Надо было уменьшить в размере электроды и в то же время увеличить их поверхность. Так родилась идея пористых электродов. Она очень проста. Чем мельче в них поры, чем их больше, тем больше и внутренняя поверхность. Особенно показателен уголь: в одном его грамме заключены сотни и даже тысячи квадратных метров (гектары!) поверхности.

Откуда набегают такие цифры? Для ответа проще

всего взять кубик (один сантиметр) любого вещества и начать его дробить.

Разделим кубик на тысячу более мелких, то есть каждое ребро исходного кубика делим на 10 равных частей, и подсчитаем их суммарную поверхность.

Легко видеть, что вместо начальных 6 квадратных сантиметров (поверхность исходного кубика) имеем теперь 60 квадратных сантиметров: число новых кубиков (10^3) помножаем на $6 \cdot 10^{-2}$ квадратного сантиметра.

Если продолжить этот процесс дробления до кубиков миллимикронных (ребра длиной в 10 ангстрем = 10^{-7} сантиметра), то набежит уже $6 \cdot 10^7$ квадратных сантиметров, или 6000 квадратных метров. И вся эта уйма площади заключена все в том же кубическом сантиметре объема.

Продолжая эти школьно-арифметические упражнения, нетрудно подсчитать, что один грамм платины, раздробленной до частичек размером в десятки ангстрем, мог бы обеспечить токи в несколько тысяч ампер. Колоссальное количество электроэнергии! Да на такое дело и драгоценной платины было бы не жалко.

Проблема топливного элемента решена? Все еще нет.

СВЕСТИ НЕСВОДИМОЕ

Создатель топливных элементов Гров, видимо, очень сомневался, что его изобретение когда-либо даст значительные токи. Он писал: «Что касается химического или каталитического воздействия, то можно предположить, что при использовании обычной платиновой фольги оно имеет место на линии уровня воды, где соприкасаются жидкость, газ и платина, поэтому основная трудность состоит в получении более или менее значительной активной поверхности».

Да, уже Гров, по существу, понимал необходимость использования пористых электродов, их высокоразвитой внутренней поверхности. Но он же сознавал и трудности этого дела.

В электрохимических процессах, идущих на любом из электродов топливного элемента, обязательны три главных действующих лица: газ (скажем, водород, являющийся топливом), электролит (поставщик ионов) и катализатор (твердое металлическое тело, например пла-

тина, которая не только катализирует процесс, но и служит проводником для образующихся электронов). И весь этот ансамбль должен действовать слаженно, а, главное, совместно. Вот тут-то трудности и начинаются.

Чтобы получить большие токи, надо сделать, казалось бы, невозможное: нашпиговать поры электрода одновременно и газом и электролитом, хотя эти субстанции взаимно вытесняют друг друга.

Если пористый электрод просто привести в соприкосновение с раствором электролита, то он заполнит все его поры, так как металлы-катализаторы хорошо смачиваются водой. Доступ газа к внутренней поверхности электрода будет затруднен (газ крайне слабо растворим в воде), и снимаемый с электрода ток окажется мал.

Если же — другой предельный случай — газ подавать в электрод под большим избыточным давлением, то он вытеснит электролит из большинства пор, и теперь уже сильно затруднится поступление электролита к поверхности реакции. Значит, и на этот раз ток, получаемый с единицы внешней поверхности пористого электрода, также окажется невеликим.

Свести несводимое — вот она задача. Над ней ломали голову и столетие спустя после открытия Грова.

Академик А. Н. Фрумкин в одном из своих обзоров, написанных перед Великой Отечественной войной, писал:

«Необходимо в первую очередь отметить, что вопрос о создании и улучшении химических источников тока решается не только на основании какой-нибудь электрохимической теории. Это проблема комплексная, в которой приходится считаться и с целым рядом чисто конструктивных моментов. Здесь многое зависит от удачного выбора конструкции и иногда больше, чем от изучения механизма процесса...»

Совершенная конструкция топливных элементов — этим были заняты многие поколения ученых и изобретателей.

Казалось бы, чего проще: возьмем в качестве электрода платиновую чернь — пористую губку из мелких кристалликов платины, с высокой удельной внутренней поверхностью. И брали: вначале ток был велик, но как только платиновая чернь намокала, снимаемые с электрода токи становились непозволительно малыми.

Наглядное тому свидетельство — работа Монда и Лангера. В 1889 году, используя платиновую чернь, они

создали (и доложили об этом Королевскому обществу в Лондоне; кстати, именно они назвали устройство топливным элементом) полутораваттную установку с использованием пористых электродов. Кпд установки 50 процентов.

Путем ряда тонких ухищрений Монд и Лангер добились, чтобы платиновая чернь была частично сухой, частично смоченной. Но широкого применения их устройство не получило. Оно было и дорогим и, главное, слишком капризным. Иногда токи в нем были на удивление высокими, но вдруг по малопонятным причинам все шло насмарку. Неуверенность в ожидаемых результатах, невоспроизводимость загубили и эту конструкцию.

Свести несводимое — первых практических успехов в решении этой головоломки добился уже упоминавшийся здесь англичанин Ф. Бэкон. Он стал изготовлять «бипористые электроды». В них были специально созданы два типа пор: крупные (широкие) и мелкие (узкие).

Зерна катализатора смешивали и спекали с более крупными зернами особого вещества — порообразователя, затем его удаляли: оставались крупные пустоты-поры. Мелкие же поры в электроде представляли собой зазоры между частицами катализатора.

Что все это дает? Если держать газ под некоторым избыточным давлением, то он вытеснит электролит из широких пор, так как в них капиллярное давление — оно обратно пропорционально радиусу пор, если считать их для простоты цилиндрическими,— в жидкости меньше, чем давление газа. Но этого давления недостаточно, чтобы удалить жидкость также из мелких пор. При использовании «бипористых электродов» можно создать довольно значительную внутреннюю поверхность встречи трех фаз, трехфазную границу, где газ, поступающий к «месту действия» по широким порам, будет встречаться с электролитом, идущим по узким порам.

Все это позволило Бэкону не только стабилизировать трехфазную границу (газ—электролит—тело электрода), не только сделать систему послушной и воспроизводимой (чего не смогли добиться Монд и Лангер), но и получить уже довольно приличные токи, достаточные для практических нужд: сотни миллиампер с квадратного сантиметра внешней поверхности электродов.

Картина, которую мы нарисовали: электролит проникает в электрод по таким-то порам, газ — по таким-то,— довольно пока умозрительная. А как все обстоит на самом деле?

Чтобы успешно вести разработку эффективных конструкций пористых электродов, надо было прежде всего получить ответ на вопрос, как реально распределяется в порах электрода трехфазная граница. Еще раз поясним сложность проблемы.

Пористый электрод (слой пористого катализатора толщиной в несколько миллиметров, такая толщина необходима хотя бы для механической прочности) отделяет электролит от топлива или окислителя. По причинам, которые сейчас не столь важны, электродный процесс сосредоточен у электролитной стороны электрода. Следовательно, для успешной работы всей системы требуется, чтобы газ смог просочиться с газовой стороны электрода на противоположную — электролитную.

Пробиться газу через весь электрод непросто. Широкие поры, доступные для газа, распределены в теле электрода случайным образом. Поэтому «перемычки» из мелких, заполненных электролитом и недоступных для газа пор могут прерывать газовые «цепочки», блокировать подвод газа. И его проникновение в глубь пористой среды может захлебнуться.

Размеры отдельных пор невелики — микроны, десятки микрон (10^{-4}—10^{-3} сантиметра). Таких пор по толщине электрода уложится многие сотни, даже тысячи. Если бы цепочки из пор не ветвились, газ наверняка бы застревал: не доходил до цели — противоположной стороны электрода.

Ветвления пор позволяют обходить препятствия, то есть мелкие поры, закрывающие дорогу, но всегда ли? Какие поры и как реально заполнены газом? Есть ли туда доступ электролиту? Ведь он тоже необходим для электрохимической реакции.

Число подобных вопросов можно легко умножить. Кто ответит на них? Эксперименты по измерению силы тока, получаемого с единицы внешней поверхности электрода, дали неожиданный результат.

Если постепенно увеличивать давление в газе, то вначале ток мал и почти не растет. Но по достижении неко-

торого критического давления газа ток скачком возрастал до значительных величин.

Как понять это явление? Как разобраться в том, что же на деле происходит в пористом электроде? И — это уже практически важно — нельзя ли получить токи побольше, чем получил Ф. Бэкон? Не десятые ампера, а амперы и даже десятки ампер с квадратного сантиметра?..

Прежде в коловерти, столпотворении всяческих «почему» и «как» обязан был разбираться сам экспериментатор. Но с некоторых пор в штатных расписаниях многих научных лабораторий и институтов появилась новая должность — теоретик. Вначале профессиональными теоретиками обзавелась физика: здесь слова «физик-теоретик» давно получили все права гражданства. Но постепенно теоретики появились и в других науках. Их теперь можно встретить в химии и биологии, хотя в лексиконе химиков и биологов понятий, подобных понятию «физик-теоретик», еще нет.

Деятельность теоретика кое-кому с непривычки может показаться странной, но люди этой профессии существуют и приносят немалую пользу *. Во всяком случае, если вернуться к топливным элементам, порядок во взглядах на работу пористых электродов навели работающие и доныне в Институте электрохимии АН СССР в Москве физики-теоретики.

В 1963 году Владислав Семенович Маркин, доктор физико-математических наук (тогда просто Слава и даже не кандидат, а только что окончивший Московский инженерно-физический институт специалист), дал первое достаточно корректное (для того времени!) решение проблемы.

ГАЗОВАЯ ПАНДЕМИЯ

Возможно, сила теоретика в том, что он смотрит на проблему до некоторой степени глазами постороннего — со стороны виднее! Поэтому ему часто удается неожиданно сблизить, казалось бы, далекие явления и понятия.

Но скорее всего, теоретика выручает умение оперировать моделями. Сводить сложное к простому, отбрасывая

* Рассказывают, что, когда Альберта Эйнштейна как-то спросили, где находится его лаборатория, он вынул из кармана авторучку и сказал: «Вот здесь».

мешанину частностей, второстепенного и привнесенного. Когда шелуха не относящегося к делу удалена, остается лишь «скелет», остов явления.

Чтобы наши соображения не казались чересчур абстрактными, рассмотрим такую проблему. Расчертим бескрайние земные просторы на клетки вроде шахматной доски. В углах клеток посадим фруктовые деревья — яблони например.

Каждая яблоня вольна заболеть и эту свою хворь передать четырем соседним с ней деревьям. И так далее.

Вопрос такой: возникнет ли в саду эпидемия или нет? Какие должны быть для этого условия? И следовательно, как можно защитить сад?

Эта совсем не академическая задача идет по ведомству особой научной дисциплины, которая родилась в 1957 году: теории перколяции (Percolation-problem).

Ответ для нашей задачи таков: если вероятность того, что больное дерево может заразить соседнее (обозначим ее буквой γ) меньше некоторой критической величины γ_*, то эпидемии можно не опасаться, инфекция «захлебнется». Но если $\gamma \geqslant \gamma_*$, лавина инфекции станет неудержимой. Каков бы ни был размер сада, хоть засади деревьями весь земной шар, он весь будет охвачен заболеванием.

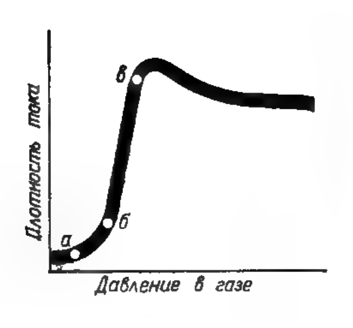
Конечно, не каждое дерево будет подвержено порче, как не каждый человек обязательно должен заболеть гриппом во времена пандемии. Но процесс сможет распространиться как угодно далеко, вовлекая все новые и новые деревья-жертвы.

Ну а как защитить сад? Очень просто. Надо развести все деревья на достаточно далекое от ближайших соседей расстояние. Ясно: чем больше оно, тем меньше параметр γ, шанс заразиться меньше.

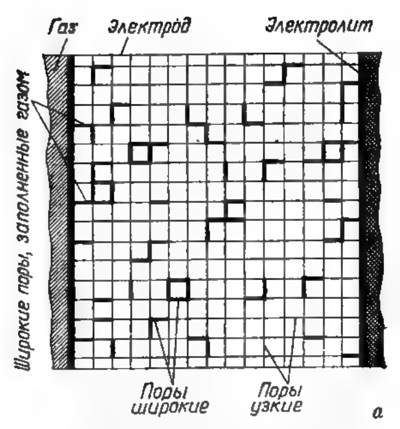
Зачем мы все это рассказываем? А чтобы показать, что, как это углядели теоретики, по существу нет никакой разницы между задачей о фруктовом саде и проблемой просачивания газа сквозь толщу пористого электрода. Вот она цепкость теории, способной сближать далекое и разное!

Покажем это.

Пусть теперь стороны клеток, то есть линии, выделяющие каждый квадратик нашей воображаемой шахматной доски, превратятся в поры электрода. И каждая



Схематический график зависимости силы тока от давления газа в топливном элементе



Модель процесса заполнения пор электрода газом и электролитом (каждое звено квадратной решетки — пора; широкие,

такая пора — сторона с вероятностью γ будет широкой, доступной для газа порой.

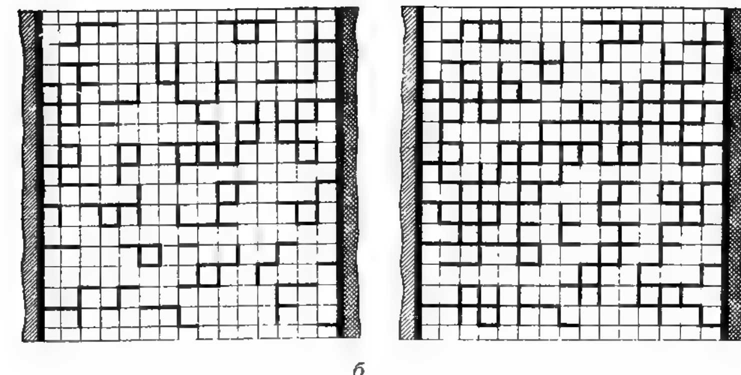
Очевидно, что этот параметр должен удовлетворять условию $0 \leqslant \gamma \leqslant 1$ и представлять собой просто долю газовых пор в электроде: ее можно варьировать, меняя технологию изготовления пористых электродов. Понятно также, что доля мелких, недоступных для газа пор, заполненных электролитом, есть $1-\gamma$.

Рассмотрим дальше (теоретики это очень любят) крайние случаи.

Пусть $\gamma=0$. Доступных для газа пор нет. В этом случае ясно, что газ никак не сможет пробиться к противоположной стороне электрода. Теоретик сказал бы, что вероятность реализации «газового кластера» (кластер — это совокупность связанных между собой элементов одного рода: скажем, газовых пор) тождественно равна нулю. Естественно, что и ток, снимаемый с электрода, тоже нулевой.

Однако на другом полюсе, при $\gamma=1$, существование газового бесконечного кластера очевидно. Все пути открыты, помех нет. Газ доберется в любое место.

Простые рассуждения. Но из них следует могучий вывод: доказательство того, что предложенные Ф. Бэконом пористые электроды могут решить проблему топливных



б в

доступные для газа поры выделены):
а, б — доля широких пор мала, они в среднем разобщены друг от друга, газ не может попасть на противоположную сторону электрода;
в — достигнута критическая концентрация широких пор

элементов, что можно развить в них трехфазную границу любых размеров, чтобы обеспечить газом электрод любой толщины.

Действительно (некоторые тонкости мы оставляем читателю в качестве домашнего задания), начиная с $\gamma_* = 0{,}5$, то есть когда каждая вторая пора — широкая, доступная для газа, и выше, по всей глубине пористого электрода, какой бы толщины он ни был, должна существовать система пересекающихся между собой «газовых» и «электролитных» пор.

Что и требовалось доказать.

Как жаль, что под рукой у нас нет доски и мела. И мы не можем нарисовать клеточки нашей условной шахматной доски. Кстати, квадратная решетка, а не кубическая, что было бы ближе к реальности, выбрана просто потому, что так проще рисовать. Мы пометили бы на ней, допустим двойными линиями, поры, доступные для газа, оставив непомеченными «жидкие поры»... И все бы стало уже совсем простым и ясным, и можно было бы наглядно объяснить наконец экспериментальные результаты!

Помните? Как при увеличении давления газа скачком возрастал электрический ток? Тогда это было загадкой, теперь же все можно объяснить.

Ток, снимаемый с электрода, резко возрастает тогда, когда вместе с ростом давления газа концентрация γ

газовых пор достигнет определенного значения. Иными словами, когда в порах на всю толщину электрода «прорастет» кластер из доступных для газа и заполненных им пор. Когда начнется (вспомним фруктовый сад) «газовая пандемия».

Конечно, теоретики Института электрохимии имени А. Н. Фрумкина АН СССР прояснили не только этот факт. Моделирование, «игры» с ЭВМ открыли перед экспериментаторами как бы новую страну — Королевство Пор с царящими там своеобразными законами и обычаями.

Многое стало ясно и, в частности, то, что система Бэкона — не самое удачное и не самое последнее слово. Расчеты теоретиков обещали большие токи: до 10 ампер с квадратного сантиметра внешней поверхности электродов.

УДАЧА И НЕУДАЧА ПАВЛА СПИРИДОНОВА

Вопрос оптимального обеспечения пор электрода и электролитом, и газом был удовлетворительно решен лишь совсем недавно. Сработала старая идея — сделать поровое пространство частично гидрофильным, частично гидрофобным. Эти слова необходимо пояснить.

Водоплавающие птицы, как известно, всегда выходят из воды сухими. Как с гуся вода, говорим мы. Тонкий слой жира на оперении как бы отталкивает воду. Жир гидрофобен, он словно страдает водобоязнью.

Гидрофобна и поверхность листьев, лепестки цветов: вспомните круглые капельки росы на них, и как легко они скатываются.

Но есть и водолюбивые, гидрофильные материалы. Вода растекается по ним, заползает во все щели и поры.

Для пористых электродов, очевидно, свойства гидрофильности и гидрофобности — находка. Ясно, что в гидрофильно-гидрофобной пористой среде раствор электролита будет проникать в электрод лишь по гидрофильным порам, по порам с гидрофобными стенками (они свободны от жидкости) пойдет газ. Поверхность встречи «газ—электролит—металл», а вместе с ней и ток станут большими.

Повторяем: идея эта стара. Гидрофобизацию электродов еще давным-давно пытались осуществить двумя методами:

либо гидрофильный пористый материал (таковы все металлические катализаторы) погружали на определенное время в раствор гидрофобных веществ (парафина, полистирола), чтобы гидрофильные стенки пор покрылись частично водоэлектролитоотталкивающими молекулами;

либо смешивали частицы гидрофильного катализатора (допустим, платиновую чернь) с порошком гидрофобного вещества — воска или того же парафина.

Схема гидрофобизированного электрода: газ заполняет те поры, в которые электролит проникнуть не может

Преимущества и достоинства таких гидрофобизированных пористых электродов фактически использовал еще инженер П. М. Спиридонов, о котором мы рассказывали в четвертой главе. Сотрудник лаборатории поверхностных явлений (руководил ею в довоенные годы академик А. Н. Фрумкин) Физико-химического института имени Л. Я. Карпова. Тот самый Спиридонов, который перед войной получил на водородно-кислородных топливных элементах токи рекордной величины, тогда это было мировым достижением.

Свои электроды Спиридонов делал так. Бралась металлическая сетка или особым образом перфорированное железо (пластинка с пробитыми в ней отверстиями). Это был костяк, остов электрода, а также токоотвод. На этот остов тонким слоем напрессовывалась активная масса — смесь угля, поскольку уголь хорошо смачивается водой и в достаточной степени проводит электричество, и каучука, гидрофобного материала. Для улучшения гидрофобизации в эту смесь добавляли парафин.

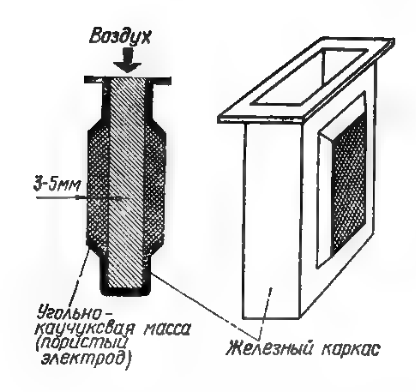


Схема воздушного электрода топливного элемента, созданного П. Спиридоновым

Система была прекрасной. В ней не было платины или других дорогостоящих катализаторов, а только дешевый и легкодоступный уголь. И все же такие топливные элементы давали значительные токи.

Успех? И да, и нет.

И каучук и все другие известные в те времена гидрофобизаторы — воск, парафин и так далее — оказались нестойкими. Они довольно быстро «промокали»: теряли свои гидрофобные свойства.

Именно это не позволило тогда решить проблему создания надежного, длительно работающего топливного элемента с высокими удельными характеристиками.

АЛМАЗНОЕ СЕРДЦЕ И ШКУРА НОСОРОГА

Только в последние десятилетия химики сумели синтезировать высокостойкие гидрофобизаторы. Особую известность среди них получил фторопласт.

Нейлон, капрон, лавсан, полиэтилен, полистирол, полиуретан, полипропилен...— все эти полимеры давно «ветераны». Новичками же, наделавшими столько шума, стали фторполимеры — полимеры, содержащие в своем составе атомы фтора.

У них много имен: у нас говорят о фторопластах, в США то же зовется тефлоном, а Англии — флюоном, в Японии — полифлоном... Но суть всюду одна: фтор (по-гречески означает «разрушение», «гибель»), самый агрессивный элемент из известных в природе, соединившись с углеродом и образовав длинные полимерные цепочки, резко изменил свой дотоле крутой нрав. В сущности, по-

лучились те же соединения, что и углеводороды, только в них атомы водорода заменены атомами фтора.

Новые материалы оказались самыми инертными (в пику чистому фтору!), самыми нейтральными, самыми химически и биологически стойкими... Из самых — самые!

И особенно уникален по свойствам политетрафторэтилен (ПТФЭ), или просто фторопласт-4 (Ф-4). Он-то, нашедший себе применение и в космической технике, и при получении ядерного горючего, и при изготовлении лезвий для бритья, и еще в тысяче дел, ознаменовал новый этап в технологии изготовления пористых электродов для топливных элементов.

Почему элементы Спиридонова и других исследователей, пытавшихся изготовить гидрофобизированные электроды, оказались неудачными? Да прежде всего потому, что, видимо, по-настоящему хороших гидрофобизаторов в природе не существует. Так уж, видно, устроен наш мир: он больше гидрофилен, чем гидрофобен.

О гидрофильности и гидрофобности материала судят обычно по поведению капли воды, лежащей на его поверхности. Если край капли образует с поверхностью острый угол ($\Theta<90$ градусов), говорят о гидрофильности. При тупом угле ($\Theta>90$ градусов) — о гидрофобности.

Не редкость встретить в природе вещества с углом Θ, близким к нулю (полная смачиваемость), а вот полной несмачиваемости что-то не наблюдается.

Обычно у гидрофобных веществ угол Θ лишь ненамного превышает прямой угол. Даже у фторопласта, этого, можно сказать, чемпиона гидрофобности, угол Θ порядка 120 градусов, но никак не 180 градусов — полная несмачиваемость! И результат: если гидрофильные стенки пор гидрофобизировать, сделав их частично гидрофобными, то суммарно поверхность останется все же либо практически гидрофильной, либо довольно быстро промокает, ведь вода очень активный и въедливый агент.

Для гидрофобизации пористых электродов нужен был принципиально иной подход — его дал фторопласт, его особые свойства.

Золото — металл благородный: не растворяется ни в кислотах, ни в щелочах. Однако против действия царской водки, смеси азотной и соляной кислот, и золото бессильно. У алхимиков для этого факта был особый символ: лев, пожирающий солнце. Но фторопласту и «лев» не страшен! По химической стойкости Ф-4 превосходит не

только благородную платину, инертный графит, стойкий кварц, но и все известные ныне синтетические материалы. Потому-то и требуется он всюду, и производство его уже превышает десятки миллионов тонн, гораздо больше, чем, скажем, алюминия.

В чем секрет фторопласта? Видимо, прежде всего в структуре его молекул. Фтор как наиболее реакционно-способный из элементов здесь намертво «вцепился» в углерод, образуя очень прочные химические связи. Вдобавок цепь из примерно 10 тысяч повторяющихся молекулярных звеньев в этой молекуле закручивается вокруг своей оси в спираль. И при этом так хитро, что образуется плотная оболочка атомов фтора вокруг углеродного скелета.

Эту особенность фторуглеродов и имел в виду американский химик Д. Саймонс, долгие годы изучавший нрав этих соединений и заявивший, что у фторопластов «алмазное сердце и шкура носорога». Сюда бы еще следовало добавить, что шкура эта оказалась на удивление гидрофобной.

А для проблемы пористых электродов важно еще и то, что в результате полимеризации газообразного тетрафторэтилена образуется белый кристаллический порошок — это и есть фторопласт.

Главное, что этот порошок, агломераты кристалликов Ф-4, порист внутри. А значит, и стенки этих пор чисто гидрофобны, без каких-либо гидрофильных примесей. И вход туда воде строго заказан. И тут уже не столь важно: каков угол несмачивания по абсолютной величине — велик или мал.

Если теперь, а это и делают, смешать порошок фторопласта с мелкими зернами катализатора, то в такой смеси будут гарантированные, как бы «встроенные» в пористый электрод каналы для подачи туда газа.

Ни с воском, ни с парафином, ни с каким-нибудь другим из прежних кандидатов в идеальные гидрофобизаторы по технологическим и иным причинам сделать это не удается. Поры с гидрофильно-гидрофобными стенками? Пожалуйста. А полностью гидрофобные? Да к тому же очень мелкие, что важно для получения еще больших токов, как утверждают расчеты теоретиков? Такого еще не было.

Вот так фторопласт-4 круто изменил судьбу топливных элементов. Электроды начали давать токи на поря-

док примерно выше, чем гидрофильные образцы бэконовского типа.

Эти меры и обусловили успех дела: топливные элементы стали конкурентоспособными, их используют теперь для различных (список этот все растет) нужд, не только для космических полетов. Так, благодаря пористым гидрофобизированным фторопластом электродам проблема топливного элемента была принципиально решена.

МЕРТВОЕ СБЛИЗИТСЯ С ЖИВЫМ

В эволюции топливных элементов, при конструировании одного из важнейших его «органов», пористых электродов, прослеживается любопытная тенденция. Стремясь к чисто техническим идеалам, отталкиваясь от безжизненных металлов и пластмасс, мало заботясь о подражании живому, человек, однако, творит вещи, удивительно родственные и созвучные лучшим образчикам природы. Получается, что в своей деятельности он невольно как бы переизобретает то, что давным-давно изобретено в живой стихии.

В самом деле, человеческая «машина» слагается из миллиардов мельчайших клеточек. Энергию в каждой вырабатывают малютки МХ. Энергетические крохи, капли. Но мы воочию видим: человек, этот сконструированный природой робот, в состоянии поднять над головой штангу в 200 килограммов и больше, перепрыгнуть через планку, висящую на двухметровой высоте.

Не то же разве и в топливных элементах, где микротоки-ручейки сливаются в токи-реки величиной в сотни ампер! Мы знаем: ключ к этому чуду — в совершенных пористых электродах, мысль о которых вызревала у человека в течение многих десятилетий.

Когда-то, на заре жизни, перед природой стояли те же проблемы, что и перед творцами топливных элементов: надо было из слабого (сила элементарных биохимических реакций — тот же обмен электронами! — столь же невелика, как и при электрохимических метаморфозах) сотворить сильное, из малого большое.

Природе это блестяще удалось. При этом был «выработан» ряд принципов организации живой материи.

Первый — использование больших поверхностей. Всюду в биологических системах отношение поверхности к объему чрезвычайно велико.

Легкие человека, например, состоят из 300 миллионов пузырьков — альвеол с общей поверхностью, как подсчитал один советский ученый, как у волейбольной площадки.

В крови содержится около 22 триллионов красных кровяных шариков-эритроцитов; если оценить и их поверхность, то уместно говорить уже о сравнении с футбольным полем.

Слизистые оболочки кишечника состоят из бесчисленного множества капилляров и ворсинок. Их поверхность на удивление велика и никем еще, видимо, не измерялась.

Теперь о втором принципе живого. Об умении жизни «ловко» использовать пористые среды.

Яркий пример дает нам зеленый лист.

Вот уравнение фотосинтеза:

$$\underset{\text{Свет}}{h\nu} + CO_2 + H_2O \xrightarrow{\text{хлорофилл}} \underset{\text{углеводы}}{C(H_2O)} + O_2 \text{ (кислород)}$$

При фотосинтезе углекислый газ воздуха, соединяясь с водой, под действием света (его квантов энергии $h\nu$) и в присутствии «катализатора» — хлорофилла дает в качестве продуктов реакции углеводы и кислород — побочный продукт, им дышит все живое.

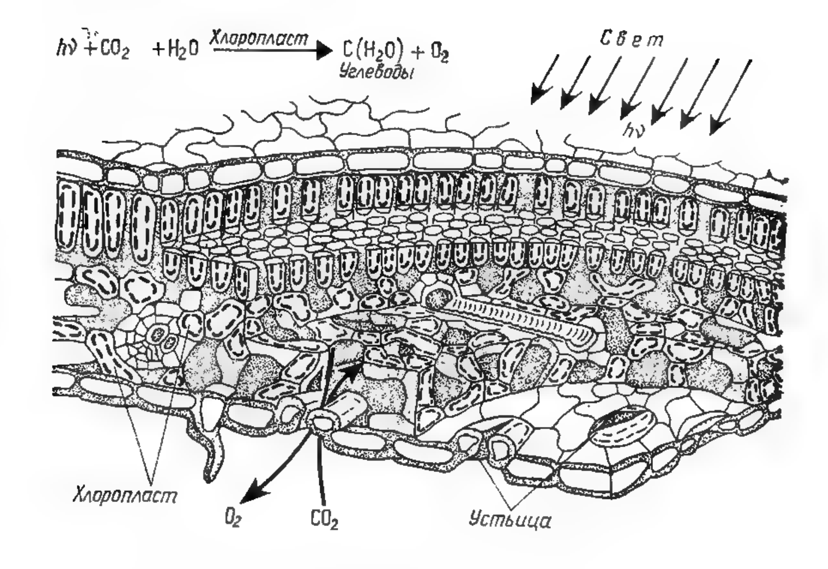
Хитрость процесса в том, что в зеленом листе должны соединиться три различные стихии: газ, жидкость и электромагнитные волны. И тут важны не только тончайшие биофизические и биохимические процесы, но и структура листа.

Как видим, проблема та же, что и в топливном элементе, где надо свести газ, электролит и электроны.

Внешне лист кажется зеленой лепешкой. Но разрежьте ее бритвой и взгляните на срез в микроскоп — увидите чудесную картину. Лист внутри порист, словно губка. На долю пор приходится 20—30 процентов его объема. Эта «мера» облегчает дыхание и проникновение углекислого газа к клеткам мезофилла — к мякоти, рыхлой и также пористой ткани листа.

Эффективность работы листа обеспечена и тем, что один кубический сантиметр зеленой ткани листа заключает в себе 100—200 квадратных сантиметров «рабочей» поверхности.

Расположенная где-то в толще листа отдельная клетка мезофилла, в которой плавают хлоропласты, крошечные органеллы зеленой клетки, эти «цехи» фотосинтеза,—



Схематическое изображение структуры зеленого листа

конечная инстанция для всех потребляемых листом веществ. Именно она должна быть в достаточной степени и одновременно обеспечена лучистой энергией, влагой и углекислотой. На нее работают и устьица («ворота» — отверстия на поверхности листа), и внутренние поры, и «трубопроводы» — проводящие воду жилки растения.

Итак, вновь параллели между техникой и природой.

Третий принцип, которого «придерживается» природа,— это использование гидрофильно-гидрофобных пористых сред.

В том же листе проблема дозировки решена гидрофильно-гидрофобными средствами; иначе поры листа были бы полностью затоплены влагой, и газ бы туда не попал.

И опять невольно вспоминаются гидрофобизированные пористые электроды в самых современных топливных элементах.

Удивительно еще и то, что, хотя весь животный и растительный мир вышел из океана, биохимические реакции протекают вовсе не в водной (гидрофильной), а в гидрофобной среде. Ибо вода, как уже было сказано, очень агрессивный элемент: она активно вмешивается в про-

цессы и «смазывает», нарушает их стройность и специфичность.

В воде белок, например, принимает форму глобулы (шара), и лишь в гидрофобной среде он, расправляясь, принимает рабочее состояние.

Известно далее, что в водной среде скорость биохимических реакций на несколько порядков меньше, чем в среде гидрофобной. И сейчас биохимия стоит на пороге создания нового и важного раздела — биохимии неводных сред.

Можно задать вопрос: а как в живом образуются области гидрофобности? Все биологические мембраны построены из фосфолипидов — молекул, имеющих как гидрофильные, так и гидрофобные концы-хвостики. Работающая клетка, объединяя одноименные хвостики, может «по желанию» создавать в мембране локально как гидрофильную, так и гидрофобную среду. Может инициировать, ускорять процессы, но может и гасить их.

Конечно, между гидрофильностью и гидрофобностью пористых электродов топливных элементов и теми же свойствами живой клетки дистанция еще немалая, однако по мере усложнения технических систем (вовсе не обязательно только электрохимических!) мертвое будет неуклонно сближаться с живым, становясь одновременно удобной моделью, помогающей вызнать все самые сокровенные тайны жизни.

Глава 6,

читатели, которые теперь, мы надеемся, уже достаточно знакомы с топливными элементами, несомненно хотели бы знать: сбудется ли (если да, то скоро?) пророчество Оствальда о торжестве электрохимической энергетики?

Когда ошибаются пророки

Человек компетентный — это тот, кто заблуждается по правилам.

Поль Валери

Некогда Гёте предсказывал: ни микроскоп, ни телескоп никогда не найдут себе полезного применения.

Динамит, заявил его изобретатель Альфред Нобель, сделает все войны невозможными.

Получается: если тот или иной пророк очень хочет ошибиться, ему надо лишь сказать твердое «нет».

«Электричество — всего лишь забавный фокус...»; «Автомобиль никогда не вытеснит лошадь...»; «Самолет — игрушка, не имеющая никакого практического значения...» Все эти отрицания в свое время высказывали серьезные, вполне компетентные, многоученые люди. Не какие-то там чудаки от науки.

Но не надо думать, что прогнозы в науке и технике обязательно должны быть ошибочными. Легко привести и примеры удивительных прозрений. Английский писатель Самуэль Джонсон за 80 лет до открытия микробов высказал предположение, что невидимые глазом организмы являются причиной дизентерии. А английский монах Роджер Бэкон (1214—1292) предвидел появление лодок, приводимых в движение механическим путем, летательных аппаратов и машин, которые позволят человеку разгуливать по дну морскому.

Итак, глава, в которой обсуждается компетентность человека предвидеть будущее: угадывать и делать ошибки.

ПРОСЧЕТ ОСТВАЛЬДА

Медицина, вероятно, уже в следующие десять лет получит лекарство против тучности. До 2000 года, возможно, научатся лечить все виды рака. До 2010 года будет получено лекарство, замедляющее старение, и к 2030 году средняя продолжительность жизни достигнет 130 лет.

По прогнозам зарубежных футурологов, 1982

В 1894 году В. Оствальд сделал прогноз о будущем энергетики. Он не сомневался в победе топливных элементов.

Сколько ждать? Десять лет, двадцать?.. Оствальду тогда было 40: надо полагать, он надеялся дожить до свершения своего предсказания. Однако электростанции на топливных элементах, да и то экспериментальные, начали строить недавно (об этом еще будет разговор), через восемь десятков лет после пророчества Оствальда.

Почему Оствальд ошибся? Что задержало приход ЭХГ в энергетику? Об этом выше уже говорилось.

Добавим еще несколько соображений.

В тепловой машине благодаря Карно и многим другим ученым-термодинамикам в основном давно все понятно. Расчеты по тепловым машинам стали обычными инженерными задачами.

Не то электрохимический генератор. Тут все идет на молекулярном и электронном уровне. Даже и сейчас многие вопросы электрокатализа, теории пористых электродов и иного прочего до конца не ясны.

Еще одну версию незадачливости топливных элементов дал известный американский электрохимик Джон Бокрис. Он объясняет дело почти полувековым засильем в химической науке термодинамики. Термодинамический подход позволил В. Нернсту выявить теоретически все главные соблазны топливных элементов. Но та же термодинамика, полагает Бокрис, привела и к отсрочке их торжества.

Классическая термодинамика, как известно, в основном занимается процессами обратимыми. А в топливном элементе многие явления носят кинетический, явно необратимый характер. Вот, дескать, химики и инженеры, следующие термодинамическими дорожками (к тому же

плохо связанные с физиками, которые могли бы им помочь), и терпели неудачу за неудачей.

Формула Нернста обещала одно (например, сжигание каменного угля в топливных элементах почти со 100-процентным кпд), а на деле получалось совсем иное, точнее, ничего не получалось.

Полвека, утверждает Бокрис, электрохимия пребывала в застое. И лишь в России задержка прогресса этой науки была менее ощутима. Там электрохимики были менее подвержены нернстовскому влиянию. Кроме того, здесь еще в начале 30-х годов сложилась и действовала сильная школа электрохимиков, которую создал академик А. Н. Фрумкин.

С Бокрисом можно спорить, можно и соглашаться. А можно дать еще одно объяснение, почему Оствальд допустил такой просчет. Просто он смотрел слишком далеко, непозволительно далеко вперед.

У нас в стране составлением годовых планов заняты миллионы, пятилетних — уже десятки тысяч, а если говорить о перспективных планах на 10—20 лет вперед — тут останутся уже лишь сотни человек. Еще более отдаленным будущим занимаются единицы.

Теперь об ошибках в прогнозе.

В годовых планах — это проценты. В пятилетних, если огрублять картину, десятки процентов разнобоя между ожидаемым и действительностью.

В перспективных же планах никто и не ждет точных соответствий. Тут уместны уже несколько вариантов: есть оценки пессимистические, оптимистические, средние.

Но если заглядывать на сто, может быть, даже двести лет?

Есть смельчаки, которые рассуждают о трехтысячном годе!

И такое, конечно, случается, но здесь уже речь идет о гипотезах. И все это оказывается где-то на грани фантастики.

Видимо, для серьезных прогнозов есть некий предельный срок. Не тут ли корень просчета Оствальда?

В БУДУЩЕЕ... НА ЯДРЕ?!

Космонавтика в период с 1993 по 2030 год настолько продвинется вперед, что на Луне и в открытом космосе будут построены центры для управления человеческой деятельностью в космическом пространстве. До 2010 года на Марсе приземлится первый земной корабль с человеком на борту, начнется строительство космических городов. И один более отдаленный прогноз — к 3000 году бóльшая часть человечества будет жить в космосе, то есть вне Земли.

По прогнозам зарубежных футурологов, 1982

Легко трунить над пророками от науки, сложнее понять их заботы. Одна из них — нарастание темпа жизни.

Неизвестно: будет ли когда-нибудь построена машина времени, но будущее явно как бы идет к нам навстречу.

Это прессование, сжатие времени тянет за собой ряд последствий.

Первое: развитие любой технологии требует времени, которое прежде не было ограничивающим фактором. Но теперь его может просто не хватить. И это, видно, одна из причин, отчего не сбываются многие прогнозы.

Второе: от прогностов, естественно, требуется все большая точность в сроках. И они, вооружившись самыми совершенными ЭВМ, стремятся к этому. Но здесь срабатывает своеобразный (как в квантовой механике) принцип неопределенности: чем конкретнее прогноз, тем он менее достоверен, и наоборот.

Еще одна печаль футурологов — дразнящее желание подглядеть, какими открытиями порадуют людей науки.

Но невозможно в одно и то же время и знать, и не знать. Поэтому футурологи поневоле должны отказаться от попыток прогнозирования, когда речь заходит о фундаментальных исследованиях в областях, находящихся за пределами известного.

Однажды академик А. А. Байков (1870—1946), получив схему плана исследований, где была графа «Ожидаемые результаты», недовольно воскликнул: «В науке ценны неожиданные результаты!»

В этом, может быть, главные трудности всяческих прогнозов и планирований: новые открытия в науке могут опрокинуть любые концепции о будущем и самой науки, и ее порождения — техники.

Б. Г. Кузнецов, энергетик, физик, историк науки, на страницах ежегодника «Будущее науки» вспоминает, как у нас в стране ставилось дело перспективного планирования.

План ГОЭЛРО возник не на пустом месте: до его утверждения проводился долгосрочный прогноз технического прогресса, физики, промышленности, строительства городов и т. п. И все же наука тогда еще не была «тягловым» фактором прогресса. В частности, в энергетике. Новые отношения между физикой и энергетикой сформировались лишь в послевоенные десятилетия. Об этом и пишет Кузнецов. И его свидетельства очень ценны, ибо «в юности (а она начиналась у нашего поколения очень рано), — признается Кузнецов,— меня увлекали проблемы электрификации и проблемы теоретической физики. Но эти интересы не сливались...».

Интересное признание! Человеку, который одинаково глубоко разбирался и в теории относительности, и в тонкостях электрификации (редкое сочетание!), вовсе не приходило в голову перекинуть мосток между тем и другим. Об атомной энергетике и ее участии в энергетическом балансе в 30-е годы еще никто серьезно не задумывался. Тогда, свидетельствует Кузнецов, в планирующих организациях уже появились физики-экспериментаторы. Но физиков-теоретиков среди них тогда еще не было. А с ними не пришли сюда и вéсти о возможностях для энергетики самых последних и важных результатов науки об атоме.

Но если не принимать в расчет возможности новых открытий, которые могут радикально изменить наши взгляды на мир, если судить о будущем только с точки зрения забот сегодняшнего дня, то что удивительного, коль при этом будут допущены серьезные просчеты.

В 1865 году Жюль Верн опубликовал роман «С Земли на Луну», где описал первый полет человека на Луну. Угадал будущее? Предвосхитил события 1969 года? Формально да, по существу нет! Как ни напрягал французский писатель свое воображение, а ракеты он представить себе не смог, обошелся пушкой. Подобно герою Распе, достославному и бравому барону Мюнхгаузену, путешествующему на пушечном ядре, «космонавты» Ж. Верна отправились на Луну из жерла, так сказать, экстраполированной в будущее пушки. Отрешиться напрочь от настоящего, представить себе средства космонавтики наших дней даже такой изощренный фантаст не смог.

НЕСЛЫШНЫЕ ШАГИ АТОМА

В 1919 году Э. Резерфорд (1871—1937) расщепил атом и обнаружил в нем ядро: фундамент для атомной энергетики был заложен. Но до последних своих дней ученый не верил, что его открытие даст практические результаты. Однако через восемь лет после смерти Резерфорда американцы взорвали первую атомную бомбу, а спустя еще девять лет в СССР была пущена первая АЭС.

1894 год. Оствальд: «Тепловые машины плохи, грядет эра топливных элементов».

То был прогноз «пушечного ядра». Ученый исходил лишь из тех возможностей науки и техники, которые имелись в тот момент. Не мог Оствальд знать, что через два года будет сделано открытие, знаменующее новую эру.

В 1896 году Антуан Анри Беккерель (1852—1908), французский физик, открыл радиоактивное излучение солей урана. А еще через два года Пьер Кюри и его жена Мария Кюри-Склодовская, продолжая начатое Беккерелем, открыли в урановой смолке (минерал уранинит) радий. Чтобы выделить его крупицы, супруги Кюри в своей плохонькой лаборатории переработали тонны (!) заводских отходов, остававшихся после извлечения из смолки урана, когда-то уран использовали только для производства красок и стекла.

Радий («лучистый») — естественный радиоактивный химический элемент. При распаде атомов в грамме радия за час выделяется около 550 джоулей теплоты.

Новый невиданный, неожиданный источник тепла, а значит, и энергии. Не только Оствальд, ученый с мировым именем, многие обратили тогда внимание на этот факт.

В 1904 году Марк Твен пишет рассказ «Сделка с Сатаной». В нем Сатана, существо, излучающее странное серебристое сияние, признается герою, что сделан из... чистого радия. Герой рассказа продает Сатане душу, и Сатана расплачивается своим драгоценным радиевым телом («по 3 миллиона за фунт»). Вот что при этом приговаривает Сатана: «Моими девятьюстами фунтами можно обогреть весь мир, залить его светом, дать энергию кораблям, всем станкам, всем железным дорогам — и не израсходовать при этом и пяти фунтов радия!..»

В 1906 году, довольно рано, Оствальд подает в отставку. Он теперь мог без помех следить за всеми новинками

науки и техники. Не могли пройти мимо него ни теория относительности (1905), ни та небольшая статья (1906), в которой Эйнштейн обнародовал свое знаменитое соотношение:

$$E = mc^2.$$

Энергия пропорциональна массе (c — скорость света в вакууме).

На этом соотношении строил Оствальд (неисправимый идеалист) свою философию энергетизма. Но сесть за письменный стол и написать пророческие слова о наступлении атомной эры, которая, возможно, отменит теплоэнергетику и, может быть, исковеркает судьбу топливных элементов,— сделать этого ученый не смог.

Дальше события, мы знаем, развивались бурно и решительно.

В 1919 году Э. Резерфорд добрался до атомного ядра. Вначале полагали, что оно состоит лишь из положительно заряженных протонов.

В начале 30-х годов (Оствальд скончался в 1932) в атомном ядре обнаружили и нейтроны («ни тот ни другой» по-латыни, то есть не имеющий заряда).

Было уже известно и о дефекте массы, о возможности при трансформациях ядер (скажем, при делении урана, который обстреливается нейтронами) освобождения громадной энергии.

Нет надобности здесь подробно называть научные события, приведшие к первой АЭС в Обнинске, об этом написаны десятки книг. Подчеркнем лишь следующее.

Диву даешься: на виду у всех атом сделал быструю энергетическую карьеру. Только кажется, что шаги его были до поры до времени неслышными. Лишь изредка раздавались пророческие голоса — и об опасности для человечества, которую таит в себе атом, и о его же благе для земной цивилизации.

ОТ ПРОРОЧЕСТВ — К ПРОГНОЗАМ?

...1970 год — расшифровка языка китообразных, ядерные ракетные двигатели; 1980 год — открытие гравитационных волн; к 2010 году энергетические возможности человечества будут сопоставимы с энергоотдачей одной звезды...

По прогнозам зарубежных футурологов, 1982

В последние десятилетия начала складываться новая научная дисциплина — прогностика.

Ее истоки — в далеком прошлом. Еще две тысячи лет назад Гиппократ (ему-то мы и обязаны словом «прогноз», этот отец западной медицины, оставил нам книгу «Прогностикон») в своих предсказаниях хода болезни пользовался осознанным опытом врачевания и знанием анатомии.

Научному подходу к прогнозированию способствовало и появление в 1902 году книги Герберта Уэллса «Предвидения».

И все же по-настоящему прогностика оформилась совсем недавно — после второй мировой войны.

Считается, что сейчас имеется около 150 различных методов прогнозирования, однако на деле чаще всего используют лишь приемы, сводящиеся к четырем основным группам: анализу патентной информации, экстраполяции, моделированию и экспертным оценкам.

На Западе организации, занимающиеся футурологией, растут как грибы после дождя. К началу 70-х годов их число в США и Западной Европе перевалило за 500.

Стали выходить десятки специальных журналов, в массовых газетах появились постоянные футурологические рубрики. Кино и телевидение вновь и вновь возвращаются к этой теме.

Наша беда в том, жаловался один футуролог, что от нас ждут гораздо большего, чем мы можем дать.

Действительно, широкая публика, как и в старину, ждет чудес, сказок. Кому, в самом деле, нужны предсказания, что день завтрашний будет унылым и пасмурным?

Человеческий ум легко экстраполирует. Рисует роскошные картины с летающими автомобилями, космическими городами, с домами в тысячу этажей, с роботами, неотличимыми от людей,— со всем реквизитом научной (и часто ненаучной!) фантастики. Вольно или невольно, но

даже самые серьезные и скупые на обещания футурологи в какой-то степени вынуждены подыгрывать этим настроениям. Впадать в обещательский грех.

В 1964 году в Англии вышел сборник статей «Мир в 1984 году». То было собрание прогнозов видных ученых и руководителей крупнейших промышленных организаций Запада. Позднее перевод этого сборника вышел в СССР под заглавием «Горизонты науки и техники».

20-летний срок истек, сбылись ли предсказания?

Многое из обещанного — конструирование домашнего робота-уборщицы, автоматический перевод с иностранных языков, достижение самолетами гражданской авиации скоростей полета в 5000 километров в час, обуздание термояда, синтез эликсира жизни, продлевающего ее на 50 лет, и многое другое — не сбылось.

Правда, официальные пророки становятся более осмотрительными. В одном из прогнозов фигурировала запретительная графа «Никогда», словно крик ворона в балладе Эдгара По «Nevermore!».

Часть экспертов наложила вето на использование телепатии для связи, не верит в возможность прямого фиксирования знаний в человеческом мозгу, отрицает, что будет установлена связь с внеземными цивилизациями.

Еще одно трудное для предсказателей дело — уйти от модных тем настоящего. Отрешиться от того, что так назойливо каждодневно навязывает людям информация и реклама голосами радио- и телекомментаторов, страницами газет.

Теперь о топливных элементах. Был обещан электромобиль. И совершенно новый принцип его конструирования, когда электродвигатель, питаемый от топливных элементов, будет находиться в ступице каждого колеса.

Система силовой передачи в том виде, как она существует сегодня (1964), утверждали пророки в книге «Мир в 1984 году», будет ликвидирована, и это приведет к повышению до максимума момента вращения при минимальной скорости двигателя. Конструктор автомобиля сможет переключить все свое внимание на пассажиров и водителя.

Топливные элементы должны были произвести переворот и в железнодорожном транспорте. Линии электропитания ликвидировались, что должно было резко повысить автономность и маневренность транспорта.

Топливные элементы, было обещано, широко войдут

в быт. И топливом для них станут газообразные углеводороды.

И эти прогнозы пока не сбылись...

Глава 7,

о самых разных вопросах, относящихся к электрохимии и к топливным элементам тоже

Будни электрокатализа

XX век — это не век электричества или биологии, не век атомной энергии или кибернетики, не век полимеров или полупроводников, как твердят горячие поклонники той или иной научной дисциплины: наш век — это просто век науки.

В начале 60-х годов газеты и журналы мира облетело сенсационное сообщение: в США построен трактор, работающий на топливных элементах. Специалистов особенно впечатляло то, что в качестве топлива этот трактор потреблял пропан — дешевую горючую компоненту природных и попутных нефтяных газов.

Казалось, сбываются мечты электрохимиков о повсеместном пришествии топливных элементов на транспорт. Однако то была всего лишь газетная научно-техническая «утка». На деле топливный элемент трактора работал не на пропане, а на водороде. И двигался-то трактор всего 15 минут, после чего занял место в музее техники.

Приведенный пример в достаточной мере красноречив и симптоматичен. Что требуется, чтобы топливные элементы широко вошли в технику и быт? Что необходимо сделать, чтобы они из экзотичных космических существ превратились в создания вполне ординарные и земные?

Прежде всего они должны работать не на чистейших кислороде и водороде, а на воздухе, где кислород разбавлен инертным азотом и другими примесями, и использовать в качестве топлива доступные, встречающиеся в природе в готовом для употребления виде вещества. Вот тогда, возможно, топливные элементы действительно смогли бы повсеместно заменить менее эффективные гальванические элементы и аккумуляторы, а также двигатели внутреннего сгорания и другие тепловые машины.

Неприхотливость в «еде», умение обойтись дешевыми, общедоступными «продуктами», способность перейти

с рафинированной «диеты» на, так сказать, «общий стол» — все эти полезные привычки ученые-электрохимики старались и стараются привить топливным элементам. На этом пути были успехи, были и огорчения, но остаются и немалые надежды. Обо всем этом поведает данная глава.

ПОД АККОМПАНЕМЕНТ РЕКЛАМЫ

Водородно-кислородные топливные элементы самых разных типов стали разрабатывать сразу во многих промышленно развитых странах.

Еще в 1948 году в Техническом институте в Брауншвейге (ФРГ) началась исследовательская работа по топливным элементам под руководством профессора Э. Юсти. Она затем была подхвачена в Швейцарии, Франции, Швеции, США.

Исследования эти были доведены до практических результатов. Так, к примеру, в 1965 году немецкой фирмой «Сименс—Шукертверке» была построена и испытана моторная лодка, оснащенная батареей топливных элементов мощностью 0,5 киловатта. Лодка была рассчитана на 5 человек и развивала скорость 7 километров в час.

В США наиболее активной была фирма «Юнион карбайд», где с 1955 года работа велась под руководством профессора К. Кордеша.

В 1958 году на Всемирной выставке в Брюсселе эта фирма продемонстрировала опытную батарею водородно-кислородных топливных элементов. В ней уже был осуществлен непрерывный подвод реагирующих веществ и отвод воды и тепла. Создатели этой установки полагали, что она найдет широкое применение.

По заказу автомобильной фирмы «Дженерал моторс» «Юнион карбайд» разработала и изготовила энергосистему для небольшого экспериментального автомобиля, названного «Электрован». Ее номинальная мощность равнялась 32 киловаттам, максимальная — 160 киловатт. Водород и кислород хранились в сжиженном состоянии, потому что таким образом, как показали оценки, обеспечивался максимальный пробег.

При мощности топливных элементов 90 киловатт такой автомобиль развивал скорость 80 километров в час (максимальная — 114). В зависимости от нагрузки расход жидкого водорода при пробеге 160—240 километров рав-

нялся 5,5 килограмма, жидкого кислорода — 45 килограммам.

В те же годы в США был разработан и проект подводной лодки исследовательского и поискового типа (команда из 4 человек, глубина погружения до 6 километров). Ее предполагалось оснастить энергетической установкой из топливных элементов, изготовленной также фирмой «Юнион карбайд» (средняя мощность — 25 киловатт, максимальная — 50, кпд оценивался в 58 процентов).

Следуя политике безудержной гонки вооружений, которую проводят империалисты, топливными элементами заинтересовались, конечно, военные организации США. Что же их привлекло в топливных элементах? Прежде всего то, что топливные элементы бесшумны, они не дают выхлопных газов и дыма. Они удобны как автономные источники энергии. Естественно, что многие из работ по топливным элементам были сразу же засекречены, а если их и излагали, то часто умышленно в искаженном виде.

Работа по топливным элементам велась очень широким фронтом, вовлекая исследователей самых разных специальностей. Но особенно активны были, конечно, электрохимики. Тогда каждая пятая научная статья, публиковавшаяся в журналах, близких к физической химии, была электрохимической. Спрос на электрохимиков резко возрос, высшие научно-технические заведения во многих странах стали выпускать их в гораздо большем количестве.

Достижения электрохимии широко освещались не только в научной, но и в популярной печати. Чтобы убедиться в этом, достаточно полистать хотя бы наши журналы тех лет — «Науку и жизнь», «Знание — сила», «Техника—молодежи» *.

Очень усердствовала (главным образом, за рубежом) реклама. Под ее аккомпанемент щедрым потоком текли многочисленные обещания. Словесные авансы раздавались направо и налево. Нет нужды их перечислять. Общий тон хорошо передают слова К. Кордеша, написанные им в одной из статей: «Можно с уверенностью предполагать,

* Полезно также прочесть популярную книгу Б. Б. Дамаскина и О. А. Петрия «Современная электрохимия» (М., Наука, 1965). Ее общий мажорный тон свидетельствовал не только о молодости ее авторов — теперь это доктора наук, профессора, известные и у нас, и за рубежом электрохимики,— но и о большом подъеме, который переживала тогда электрохимия. Казалось, еще немного, вот-вот, и топливные элементы совершат подлинную техническую революцию.

что топливные элементы в конечном итоге станут главным источником энергии, вытеснив другие электрохимические устройства из самых разных областей применения».

Последняя оговорка была осторожностью умудренного наукой и жизнью человека. Но подобной цензуры не было у газетчиков и журналистов. Они смело утверждали, что и вся Большая энергетика будет скоро построена на топливных элементах.

В ПОИСКАХ ПОДХОДЯЩЕГО ТОПЛИВА

Топливные элементы в принципе всеядны, однако желание получить приемлемые токи и напряжение на элементе и ряд других требований заставляют человека обеспечивать эти устройства по возможности неплохой («электрокалорийной»!) или хотя бы сносной «пищей».

Центральный вопрос — это вопрос о топливе. При его выборе космические и земные критерии вступают в противоречие. В космосе водород давал максимум энергии на единицу веса, и это было главным. На земле же это достоинство не казалось таким решающим, на первый план выдвигались факторы негативного характера — экономические и технические.

Перебрав многие топлива, исследователи разбили их условно на три класса. В первом (в единственном числе) оказался водород. Во втором разместилось многочисленное семейство углеводородов (их общая формула — C_nH_m, где n и m — целые числа). В третьем классе оказалось несколько химических соединений, названных «компромиссным топливом».

Водород — топливо энергоемкое, но очень дорогое (пока еще до «водородной эры» далеко, повсеместное производство водорода не налажено). Заменить его углеводородами — природным газом, бензином, керосином — топливами дешевыми (так считали в 60-е годы) и распространенными было бы очень желательно.

В 1964 году, когда составлялся прогноз «Мир в 1984 году», все сходились на том, что лишь при использовании углеводородов в качестве топлива топливные элементы одержат решительную победу над тепловыми машинами. Тогда это была центральная задача электрохимии.

Как она решалась, в чем тут трудности — об этом чуть позже. Пока расскажем о других топливах — гидрази-

не, аммиаке, метиловом, или древесном, спирте. Они не столь реакционноспособны и идеальны, как водород, но превосходят в этом отношении углеводороды (отсюда и название «компромиссные»).

Из них наиболее привлекателен гидразин (N_2H_4) — бесцветная жидкость, используемая как горючий компонент в жидких ракетных топливах.

Гидразин — чрезвычайно сильный восстановитель. В щелочном электролите его электрохимическое окисление на электроде протекает согласно реакции:

$$N_2H_4 + 4\,OH^- \rightarrow N_2 \text{ (газообразный азот)} + 4\,H_2O + 4e^-.$$

Другой электрод в топливном элементе с гидразином обычно кислородный. Поэтому в целом в элементе

$$N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2\,H_2O.$$

Термодинамическое значение ЭДС практически близко к 1,28 вольта.

Гидразин удобно, поскольку это жидкость, хранить и транспортировать. Он легко растворяется в воде, следовательно, можно обойтись без пористых электродов, что значительно упрощает конструкцию таких топливных элементов. Но, к сожалению, этот химический продукт очень дорог: в 15—20 раз дороже водорода. И к тому же довольно токсичен, обращаться с ним надо очень осторожно.

Все это и определило судьбу гидразина — он нашел применение только для специальных целей.

Когда в июне 1964 года в Гротоне (США) была испытана первая в мире подводная одноместная лодка (длина 3 метра, вес 1 тонна) с топливными элементами, она была оснащена гидразинкислородной батареей. Вот технические данные этой скороспелой поделки: запас топлива обеспечивал непрерывную работу батареи (мощность ее всего 750 ватт) в течение 12 часов, получаемая электроэнергия не только двигала лодку, но и обеспечивала освещение, связь с землей, средства навигации. Человек мог погрузиться в этой лодке на глубину до 90 метров.

Лодка называлась «Start» и была малоприкрытой рекламой топливных элементов в гидразинном варианте, попыткой заинтересовать ими командование морского флота.

Обратимся теперь к аммиаку (NH_3) — газу, являющемуся одним из важнейших продуктов химической промышленности наших дней (синтезируется из азота

воздуха и водорода, идет на приготовление жидких удобрений, служит рабочим веществом для холодильных машин).

Аммиак также может «сжигаться» в топливных элементах. Его стоимость примерно такая, как у водорода, однако он значительно уступает последнему в реакционной способности. Этим же недостатком грешит и метанол (CH_3OH) — жидкое топливо, спирт, которое в больших количествах получается в химической промышленности из природных, коксового и других углеводородсодержащих газов.

Детальное электрохимическое исследование метанола, аммиака и гидразина показало: на их основе топливные элементы революции в энергетике не совершат. В этом деле надежды могли быть связаны только с углеводородами.

Долог перечень углеводородов. Газы: метан (CH_4), ацетилен (C_2H_2), этилен (C_2H_4), этан (C_2H_6), бутан (C_4B_{10})... Жидкости: гексан (C_6H_{14}), октан (C_8H_{18}), декан ($C_{10}H_{22}$)... У всех этих веществ есть одно очень важное в плане нашего разговора о топливных элементах свойство: электрохимически сжигать их далеко не просто. Прежде вообще полагали, что этого можно добиться лишь при высоких температурах.

Известно, что с ростом температуры все реакции ускоряются (понижается энергия активации — тот «барьер», через который, чтобы прореагировать, должны «прыгать» вступающие в химическую связь молекулы).

Казалось бы, к высоким температурам и надо стремиться. Однако тут возникает серьезная проблема изнашиваемости материалов.

К большим достижениям современной электрохимии следует отнести то, что лет 20 назад, в разгар увлечения топливными элементами, была доказана возможность при температурах ниже 100 градусов электрохимически окислять до углекислого газа даже такие инертные вещества, как, например, этан.

События разворачивались так. В 1962 году американский электрохимик Нидрах показал, что в растворах кислот уже при 25 градусах Цельсия на электродах из мелкодисперсной (поверхность больше!) платины может идти электрохимическое окисление этилена. Скорость процесса была невелика (5 миллиампер с каждого квадратного сантиметра поверхности электрода), однако открытие это имело принципиальное значение.

В эти исследования сразу же включилось большое

число ученых во многих странах. Общими усилиями удалось многое сделать. Вскоре стало известно: в мягких условиях «сжечь» удается все низшие углеводороды, как непредельные, так и предельные, составляющие основную часть газообразного и жидкого природного топлива, и «сжечь» полностью — до углекислого газа.

Эти работы можно было бы назвать разведкой боем. Известно, что на войне за разведкой боем не всегда следует наступление, а если и следует, то не каждый раз оно завершается победой — случаются и неудачи. Примерно то же самое произошло и здесь: вспыхнувшая было надежда на решение проблемы по созданию топливных элементов (в промышленном варианте) на углеводородах скоро сменилась разочарованием и даже пессимизмом. Смена настроения объясняется довольно-таки просто: при попытках промышленной реализации достижений ученых встретились значительные трудности.

Однажды в Ленинграде на встрече ученых с писателями (беседа проходила в Ленинградском физико-техническом институте, в кабинете академика А. Ф. Иоффе, в 1934 году) Н. Н. Семенов, наш замечательный ученый, ныне академик и лауреат Нобелевской премии, высказал глубокую мысль. Он говорил тогда, что драматичность, а порой и трагизм положения в науке заключается в том, что ее достижения на первых порах «бесплодны для техники». «С одной стороны — удивительные открытия, а с другой — не знаешь,— говорил Семенов,— как применить их, можно ли их применить...»

Вот и в случае с углеводородами. Основная трудность была в том, что для их технического сжигания требовался очень большой расход платиновых катализаторов. Но разве могут быть экономичными топливные элементы, построенные из таких материалов, что каждый киловатт произведенной мощности будет обходиться слишком и слишком дорого? Конечно, нет!

В связи с этими объективными трудностями некоторые электрохимики ныне вовсе перестали считать проблему низкотемпературного электрохимического окисления углеводородов перспективной задачей. Они указывают на то, что по прогнозам запасы природного газа и жидких топлив быстро истощаются. А значит, вроде бы и говорить не о чем, ведь просто нечего будет сжигать!

Эта точка зрения весьма спорная, потому что трудно сказать, когда именно истощатся запасы углеводородов:

через 50, 100 лет — когда? А с другой стороны, если такая опасность и реальна, то тем более пора ограничить малоэффективное сжигание углеводоров в топках и перейти на использование «холодного» горения. Да и экологические соображения голосуют за него.

Так что закрывать проблему, видимо, рано, и дело стало лишь за тем, чтобы найти новые катализаторы — дешевые и высокоэффективные.

В ЛАБИРИНТЕ ГИПОТЕЗ

Слово «электрокатализ» (катализ для целей электрохимии, для проведения химических реакций, сопровождающихся поглощением или выделением электронов) впервые отчетливо прозвучало в 1936 году. Этот термин предложили советские физикохимики Н. Кобозев и В. Монбланова. Однако исследования этого направления получили широкое развитие только в 60-х годах в связи с нуждами топливных элементов.

Именно с успехами электрокатализа связывают теперь электрохимики свои самые светлые надежды. Хотя они и отдают себе отчет, насколько сложны возникающие здесь проблемы.

Действительно, десятки лет изучалась и сейчас наиболее хорошо изучена реакция восстановления ионов гидроксония (H_3O^+), в которой участвует всего один электрон. Здесь гидроксоний сбрасывает гидратную оболочку, присоединяет электрон — его источником служит погруженный в раствор электролита металлический электрод — и превращается в атом водорода, адсорбированный на поверхности электрода. На языке химии эта реакция имеет такой вид:

$$H_3O^+ + e^- \rightarrow H_2O + H_{\text{адсорб}}.$$

Даже этот, казалось бы, элементарный электрохимический процесс далеко не прост, все еще таит в себе много неразгаданного. А что говорить, например, о реакции электроокисления этана (C_2H_6), одного из простейших углеводородов, до углекислого газа, если в ней участвуют уже 14 (!) электронов:

$$C_2H_6 + 4\,H_2O - 14e^- \rightarrow 2\,CO_2 + 14H^+.$$

Тут начинаются будни электрокатализа. Как найти лимитирующую стадию этого процесса, то есть самую

медленно протекающую? Ибо, найдя ее, мы, наверное, сможем затем увеличить скорость окисления этана.

В лабиринте множества разнородных процессов, идущих как последовательно, так и параллельно, имеющих различную природу — физическую (диффузия ионов в растворе электролита, их миграция в электрическом поле, возникающее при этом омическое сопротивление), химическую (ионизация атомов, собственно химические реакции), электрохимическую (обмен зарядов на границе электрод — электролит), адсорбционную (прежде чем прореагировать, молекула должна закрепиться, адсорбироваться, на поверхности электрода),— среди этого множества явлений надо отыскать самое слабое звено.

Вернемся к окислению этана. Может быть, трудность этого процесса в отрыве первого электрона от молекулы этана? А может быть, одного из последующих тринадцати электронов?

Платиновый электрод в топливном элементе представляет собой активный катализатор реакции дегидрирования, отщепления атомов водорода. Значит — гипотеза! — не исключено, что молекула этана первоначально дегидрируется на поверхности платины, а затем, возможно, идет ионизация образовавшегося водорода:

$$C_2H_6 \rightarrow C_2H_4 + 2H; \quad 2H \rightarrow 2H^+ + 2e^-.$$

Но также вероятно (тоже гипотеза), что электроокислению этана предшествует реакция разряда молекул воды или (еще одна гипотеза) ионов гидроксила OH^-:

$$H_2O \rightarrow OH + H^+ + e^-; \quad OH^- \rightarrow e^- + OH,$$

а уж после этого адсорбированные радикалы, неспаренные электроны в молекуле, они химически очень активны, реагируют на поверхности электрода с адсорбированными там же частицами этана. Добавим к этому, что в этих вроде бы простейших процессах могут быть свои замедленные стадии.

А что, если — еще одно предположение — интересующая нас реакция к тому же протекает неодинаково на разных участках электродной поверхности (эта поверхность далеко не однородна, как кажется) или ведет себя совсем по-иному при разных потенциалах электрода?..

Вопросов тьма, и ответы на многие из них еще не получены. Что делают электрохимики? Они копят факты: исследуют зависимость скорости электроокисления от

различных факторов (концентрации топлива, температуры, состава раствора и т. д.), отыскивают и опробуют новые катализаторы, изучают с помощью различных методик закономерности адсорбции веществ на электрокатализаторах...

Работа сложная и большая. Она требует больших научных сил и средств. И это тогда, когда интерес к электрокатализу углеводородов несколько поостыл.

Скажем, в США в 1970—1971 годах на разработку не загрязняющих (или слабо загрязняющих) атмосферу двигателей внутреннего сгорания, у которых, как известно, кпд преобразования энергии колеблется в пределах от 8 до 15 процентов, тратили в год сотни миллионов долларов, а на проблему электроокисления углеводородов в топливных элементах (установках, обещающих кпд от 30 до 50 процентов, к тому же экологически чистых) в те же годы было затрачено лишь сотни тысяч долларов. В тысячу раз меньше!

ЗАГАДКА ПЛАТИНЫ

Главная трудность электрокатализа в том, что пока еще не создана его полная теория, теория на квантовомеханическом уровне, с расчетом взаимодействия компонентов реакции между собой и с поверхностью катализатора. Такой теории нет, как, впрочем, нет и теории (есть лишь подступы к ней) химического катализа, нет теории жидкости, теории растворов произвольных, а не малых концентраций, и многого другого, что было бы очень полезно для построения законченной теории электрокатализа. Поэтому задача предвидения электрокаталитических свойств различных веществ еще очень далека от практической реализации.

Пока подбор катализаторов для различных электрохимических реакций проводится, как правило, путем широких и довольно трудоемких эмпирических поисков. Однако ситуация в электрокатализе не является столь мрачной, как может показаться на первый взгляд. Ведь уже накоплен огромный экспериментальный материал, охватывающий разные классы катализаторов, способы воздействия на их объемные (проводимость) и поверхностные (адсорбция) свойства. Изучено большое количество типов всевозможных электрохимических реакций.

Это богатство экспериментального, опытного материала позволяет электрохимикам довольно уверенно чувствовать себя в вопросах электрокатализа, сводить сложные явления к более простым, известным, строить упрощенные модели для теоретических расчетов.

Этот так называемый феноменологический путь является весьма плодотворным и уже дал важные и для теории, и для практики результаты.

Прежде всего электрохимики разгадали загадку платины.

Этот металл, оказавшийся лучшим электрокатализатором для топливных элементов, побывал вместе с ними в космосе, он же позволил добиться низкотемпературного окисления углеводородов. Если бы не его дороговизна, с платиной можно было бы добиться многого. Но, спрашивается, отчего платина и другие благородные металлы платиновой группы (палладий, родий, иридий, рутений, осьмий), отчего эта семейка так резко выделяется своими электрокаталитическими свойствами? Отчего оказались они в столь привилегированном положении?

Ответ на сегодня таков. Платина и ее сородичи обладают совокупностью противоречивых свойств. С одной стороны, они не образуют прочных химических связей с реагентами и продуктами химических реакций, ведут себя по отношению к ним инертно, индифферентно, сами не изменяются в химических превращениях и в то же время ускоряют эти превращения. А с другой — платина хорошо адсорбирует, удерживает на своей поверхности всевозможные химические вещества, что облегчает сближение вступающих в химическую реакцию компонент. Таким образом, платина и все члены ее семейства одновременно и активны, и пассивны.

Кроме этих свойств, платина не боится ни кислот, ни щелочей, не растворяется в любом электролите. Обладает она и ярко выраженными металлическими свойствами: легко подводит и отводит электроны к поверхности электрод — раствор, где протекает реакция.

Вот вся эта гамма свойств и обусловила уникальное положение платины среди электрокатализаторов.

Но, спрашивается, неужели нельзя найти платине заменителей? Подобрать эрзацы, которые были бы дешевы и в то же время обладали бы ее свойствами? Что ж, займемся поисками. Прежде всего переберем металлы — у них хорошая, как правило, проводимость. И здесь нас

ждет разочарование. Две трети их придется забраковать, так как они термодинамически нестойки: растворяются в воде, быстро корродируют. Оставшаяся треть также не радует: плохо или совсем не адсорбирует нужные нам вещества.

Теперь, обойдя совсем изоляторы, обратимся к полупроводникам. Веществ, подлежащих перебору, много, еще больше их разнообразных комбинаций — сотни тысяч, пожалуй! Что выбрать?

Можно сразу сказать, 99 процентов из них нам не подойдет по электропроводности. Остается процент (тысячи веществ), из которых надо искать замену платине, искать ей ее электрохимических «двойников».

Этим и занимаются специалисты по электрокатализу.

ЧТО МОЖЕТ ДАТЬ НАУКА

Исследования по электрокатализу дали уже немало полезных «побочных» незапланированных результатов.

В 1965 году были открыты неизвестные ранее электрокаталитические эффекты. Было показано, что окисление метанола на комбинированном платиново-рутениевом электроде идет со скоростями на несколько порядков более высокими, чем на чистой платине (рутений вообще в этой реакции малоактивен).

Подобные явления позволяют резко усилить эффективность использования дефицитных катализаторов: вместо изрядных количеств дорогостоящей платины обходиться ее крохами.

Перебирая всевозможные вещества и их комбинации, электрохимики случайно обнаружили замечательные свойства карбида вольфрама. Это соединение прекрасно адсорбирует водород и не страшится кислотных электролитов (до карбида вольфрама со всем этим справлялась только платина).

Как видим, электрокатализу известны не только будни, но и праздники.

Успешны были и исследования (их начала, в частности, группа немецкого физикохимика Э. Юсти) по замене платины в водородно-кислородном топливном элементе на особые «скелетные катализаторы». Их получают, сплавляя металл-катализатор с алюминием. Затем алюминий удаляется растворением сплава в щелочи: остается высокопористый, с развитой удельной внутренней по-

верхностью порошок катализатора, имеющий высокую каталитическую активность.

Хороших результатов в создании топливных элементов со «скелетными катализаторами» в свое время добилась шведская электротехническая компания АСЕА. В 1966 году она запустила целый завод, который выпускал в смену батареи топливных элементов общей мощностью 8 киловатт (200 киловатт в месяц). Тогда планировалось, что эти энергетические установки будут использоваться для тракторов, городских автобусов и горного оборудования.

Еще одно (число примеров можно было бы умножать и дальше) крупное достижение электрокатализа — создание электродов (анодов) на основе оксидов рутения и титана (сокращенно ОРТА) для хлорной промышленности.

Хлор получают в основном электрохимическим способом — электролизом водных растворов поваренной соли ($NaCl$).

Газообразный хлор в электролизере выделяется на ртутных электродах. При этом попутно образуется еще водород и чистая ртуть. Потери ртути в виде паров неизбежны, что ведет к сильному загрязнению ею окружающей среды. Этих неприятностей удается избежать, если вооружить хлорную промышленность электродами ОРТА. И они уже получили широкое применение в заводской практике.

Может быть, важнейший результат деятельности электрохимиков, занимающихся электрокатализом, в том, что вся эта дружная работа заставила многое передумать, пересмотреть. Уточнить формулировку старых проблем, корректно поставить совершенно новые вопросы.

Так, к примеру, в электрохимии в последние годы стали все чаще и все громче произноситься слова с приставкой «био» — «биотопливные элементы», «биоэлектрохимия», «биоэлектрокатализ»...

МЕТАЛЛОПОРФИРИНЫ

Если внимательно проанализировать состав и свойства тех молекул, которые для своих нужд использует живая природа, то довольно быстро обнаруживается любопытное обстоятельство — ее пристрастие к некоторым

соединениям. Оказывается, у природы, созидающей жизнь, есть явные фавориты.

Особенно неравнодушна она к классу пигментов, в основу которых положена особая молекулярная конструкция — порфирины.

Костяк, каркас порфиринов представляет собой вот такое схематически изображенное молекулярное «колечко»:

Орнамент в этой кольцевой структуре может меняться в широких пределах, обеспечивая многообразие данного класса органических соединений. Но особую силу порфирины получают тогда, когда в центр кольца встраивается, вытесняя два атома водорода, какой-нибудь металл (М). Тогда порфирин превращается в металлопорфирин, играющий, переливающийся самыми яркими и разнообразными (в зависимости от того, какой металл в его центре) красками.

Сочетание металла и порфиринового кольца часто встречается в органической природе. Это уже знакомый нам хлорофилл (здесь в порфирин встроен атом магния), важнейший, быть может, среди пигментов на Земле; это красный пигмент крови и мышц — гем (тут в порфирине находится атом железа, а свойства гема усиливает белок — глобин, давая гемоглобин и миоглобин). Металлопорфирины входят в состав и многих других ключевых для жизни веществ.

Легко понять, с каким волнением и надеждами изучают ученые эти природные соединения. Использовать их возможности хотят и электрохимики, работающие в области электрокатализа.

Обнадеживает то, что искусственным путем уже удалось синтезировать соединения, которые по своему строению очень похожи на порфирины. Важнейшее из них — фталоцианин.

Оно отличается от порфиринов четырьмя бензольными колечками.

Как и его природные аналоги, фталоцианин может образовывать комплексы с различными металлами, что придает ему ряд замечательных свойств. В отличие от металлопорфиринов фталоцианин очень вынослив, что позволяет использовать его в технических целях. Он устойчив к перегреву, светопрочен.

Практически полная нерастворимость в большинстве растворителей, высокая красящая способность, чистота и интенсивность окраски обеспечили фталоцианинам известность и широкое применение в лакокрасочной, полиграфической, текстильной, бумажной промышленности, при окраске химических волокон и пластических масс в цвета синих, сине-зеленых и зеленых оттенков.

Для электрохимии имеет большое значение то, что фталоцианины инертны к кислотам и щелочам. Это позволяет надеяться на использование их в топливных элементах. Сейчас требования к стабильности электрокатализаторов — а они находятся в агрессивной среде: крепкие растворы кислот и щелочей! — резко возросли, цифры в десятки тысяч часов непрерывной работы уже не кажутся фантастическими.

Приспособить координационные соединения порфиринов и фталоцианина для нужд топливных элементов — такую задачу сейчас пытаются решить многие исследователи во всем мире. Кстати, еще раньше было установлено, что соединения фталоцианина с железом энергично окисляют олефины — углеводороды с так называемыми двойными связями. Активно занимаются этим сотрудники лаборатории неметаллических электрокатализаторов

Института электрохимии им. А. Н. Фрумкина АН СССР (ИЭЛАН), работающие под руководством профессора М. Р. Тарасевича. Им и его сотрудницей кандидатом химических наук К. А. Радюшкиной в 1982 году была написана первая в мировой литературе монография по этим вопросам — «Катализ и электрокатализ металлопорфиринами». Результаты работы этой научной группы обнадеживают.

ТОК ГЕНЕРИРУЮТ... ФЕРМЕНТЫ?

Сжигать углеводороды холодным способом сложно еще и потому, что даже при больших расходах платины не удается повысить скорость протекания реакции. Поэтому электрокатализаторы, которых так ждет техника будущего, должны быть не только дешевыми, но и достаточно мощными. В идеале хотелось бы, чтобы они в этом отношении на голову превосходили электрокатализаторы типа платины.

Как быть? И вновь подсказку исследователи получили от природы. Образцом тут стали природные катализаторы — ферменты.

Ферментами ныне увлечены многие. Их даже пытаются добавлять в бензобаки автомашин. Болгарское объединение «Техника» разработало и выпускает особый препарат «Адойл» — смесь керосина с ферментами. Утверждается, что небольшие (около кубического сантиметра) добавки «Адойла» к бензину (впрыскивается из аэрозольного баллончика прямо в топливо автомашины) на 15 процентов удлиняют пробег, избавляют от нагара свечи двигателя, уменьшают токсичность выхлопных газов.

А электрохимиков в ферментах привлекает та мобильность, которую они привносят в ход химических реакций. У многих из них число элементарных актов в единицу времени составляет 10^6—10^8 за секунду. Пока ни один из используемых в промышленности катализаторов не позволяет добиться такого ускорения химических процессов.

Биохимики установили, что ферменты обычно состоят из двух частей — огромной молекулы белка (эти гиганты имеют молекулярную массу в несколько сот тысяч — молекулярная масса водорода всего два) и крошечного так называемого активного центра, или простетической груп-

пы, в ней лишь десятки, а то и всего несколько атомов. Причем очень часто роль активного центра в ферментах выполняют наши знакомцы — металлопорфирины.

За примерами недалеко ходить: среди ферментов, содержащих в своем составе металлопорфирины, наиболее известны цитохромы — универсальные биохимические переносчики электронов в живых тканях, а также каталазы и периксидазы.

Сказавши «а», электрохимики поневоле вынуждены были произнести «б». Начав с металлопорфиринов, они перешли естественным образом к изучению электрокаталитических свойств ферментов.

А ведь насколько дерзок этот замысел! Взять кроху живой плоти — фермент, вырвать ее из привычного окружения (обычно гидрофобная среда), посадить на безжизненную «железку» — электрод в опасном соседстве с ядовитыми кислотами или щелочами и, воздействуя на нее огромными электрическими полями (в двойном слое у поверхности электрода напряженность электрического поля достигает 10^8 вольт на сантиметр), попытаться выжать из этого комочка жизни «капельки» электрического тока.

Бесспорно, задача эта сложнейшая, но совсем не безнадежная, как может показаться на первый взгляд. Во всяком случае, биоэлектрокатализ в последние годы стал быстро развиваться как научное и техническое направление.

Наибольший интерес для электрохимиков представляют в первую очередь оксидоредуктазы — группа ферментов, катализирующих окислительно-восстановительные реакции. В группу входят активные восстановители кислорода — цитохромоксидаза, лактаза и другие ферменты, и энергичный природный окислитель водорода — гидрогеназа.

Важную роль в каталитической активности этих ферментов играют различные металлы — железо, медь, молибден, входящие в небелковые активные центры.

Кроме мощи, ферменты для электрокатализа привлекательны и другой своей особенностью. Действуют они специфично. Энзимы (другое название ферментов) — страшные привереды: им подавай только их любимые «блюда». Они обычно катализируют превращение лишь одного какого-либо вещества или узкой группы однотипных

веществ и равнодушны ко всем остальным возможным процессам.

Специфичность, или селективность, ферментов на руку электрохимикам. Ведь обычно электрокатализаторы этим свойством не обладают. Чаще всего очень активные электроды в топливных элементах (в том числе и с платиной) крайне чувствительны к примесям (каталитическим ядам), содержащимся в топливах. Достаточно ничтожных примесей в топливе (скажем, в виде серо- или мышьяксодержащего вещества), чтобы электрод «отравился».

Электрохимики надеются заставить топливные элементы работать на смесях углеводородных топлив. Ведь, к примеру, бензин представляет собой смесь из многих десятков компонент, подчас довольно значительно отличающихся друг от друга.

ЭЛЕКТРОХИМИЯ ОХРАНЯЕТ БИОСФЕРУ

В настоящее время одна из областей практического применения ферментов в электрохимических системах наметилась достаточно определенно — на основе электродов с ферментами могут быть созданы датчики, позволяющие быстро и, главное, высокоселективно осуществлять контроль концентрации различных веществ.

Датчики с ферментами — только часть большого отряда созданных электрохимиками датчиков. Точнее, только малая доля большой армады приборов, позволяющих этой науке весомо включаться в дело защиты окружающей среды.

Аналитические приборы и методики контроля окружающей среды должны удовлетворять следующим очевидным требованиям. Высокая чувствительность, простота конструкции, дешевизна, доступность для автоматического сбора данных, возможность обходиться без услуг высококвалифицированного персонала, возможность использовать датчики в любой точке водного или воздушного бассейна.

Именно этим требованиям больше всего соответствуют электрохимические методики. Сюда относятся как класические, к примеру pH-метрия, полярография, кулонометрия, так и новые, скажем, ионоселективные электроды. Более 50 ионов может быть в настоящее время определено с их помощью. Это — натрий, калий, кадмий,

кальций, серебро и множество других. Уже сконструированы электроды, которые определяют концентрацию поверхностноактивных веществ, ферментов и отдельные виды органики. Возможности таких селективных электродов, по существу, еще только начали раскрываться.

ПЕРВЫЕ ШАГИ

Успех — создание селективных датчиков с ферментами — окрылил электрохимиков. И они начали разработку топливных элементов, в которых ферменты генерировали бы еще и электрический ток.

Долгое время дело это тормозилось тем, что прежде практически отсутствовали чистые препараты ферментов.

Источниками ферментов могут быть ткани различных животных. Так, ими богаты поджелудочная железа и слизистая оболочка желудка, поэтому для выделения ферментов традиционно используют отходы мясной промышленности.

Некоторые ценные ферменты получают и из высших растений. Папаин — из млечного сока дынного дерева Cacica papaya, бромелин — из стеблей ананаса, фицин — из листьев инжирного дерева. Однако наиболее доступным и почти неограниченным источником ферментов в промышленном масштабе стали микроорганизмы. Постепенно совершенствовались и методы разделения и чистки ферментов (уже разработаны методы получения высокоочищенных кристаллических ферментов — пепсина, трипсина, липазы и так далее), что и сделало их ныне доступными для исследователей, в том числе и работающих в области биоэлектрокатализа.

Вторая трудность, которую должны были преодолеть электрохимики,— это, как уже говорилось, обеспечение совместимости ферментов с неживыми материалами. Надо было научить, заставить ферменты работать в технических устройствах. Этого добивались с помощью иммобилизации. Иммобилизованные ферменты — это ферменты, связанные с каким-либо носителем, «сидящие» на той или иной «подложке». Иммобилизация позволяет создать ферментам сносные условия существования, некое подобие их родной среды, ибо и в живых клетках ферменты обычно располагаются на стенках биологических мембран.

Иммобилизация может быть осуществлена разными методами, например адсорбцией. Тут связь между ферментом и подложкой осуществляется за счет электростатических, гидрофильно-гидрофобных и других взаимодействий.

Широко применяемыми носителями при этом служат уголь, сажа, глина, оксид алюминия, силикагель. Оптимальный инертный носитель — стекло. Особенно пористое стекло, с калиброванным размером пор.

Но, кроме адсорбции, есть и более изощренные приемы иммобилизации. Ее можно проводить еще включением фермента в пространственную сетку геля. Это, как и адсорбция, также физический метод фиксации ферментов.

Существуют и химические способы. Они — одно из чудес современной науки. Здесь молекулы фермента буквально пришиваются к носителю, а «нитками» служат химические связи, возникающие между ферментом и подложкой в результате ряда тонких химических реакций. Возможны более сложные варианты. Например, сшивка молекул ферментов между собой, без использования носителя...

Иммобилизация позволила резко увеличить срок жизни ферментов, довести его до приемлемых (уже достигнуты годичные сроки!) для техники границ.

Иммобилизация не только повышает стабильность ферментов, но и позволяет сохранить, не растерять их природную каталитическую активность и специфичность действия.

Следующий очень важный для исследований шаг — надо было убедиться, смогут ли ферменты работать в пористых электродах топливных элементов. Окажутся ли они способными генерировать электричество.

Это уже события самых последних лет, время волнений, напряженного труда, время споров и томительного ожидания. И здесь электрохимики вкусили (исследования велись в Институте электрохимии им. А. Н. Фрумкина АН СССР) радость первых достижений. Фермент лактаза, иммобилизованный на электроде из сажи, восстанавливал кислород. Токи были невелики, но зато электрод устойчиво проработал в течение 50 часов, что следует расценивать как несомненную удачу.

Глава 8,

о том, что лучше: автомобиль или велосипед, про «химическую выхлопную трубу», о том, как очистить дыхание планеты, наконец об электромобилях, которые, оказывается, имеют не менее почтенный возраст, чем автомобили...

Сначала был электромобиль...

Автомобиль не роскошь, а средство передвижения.

Летучий афоризм

В 1980 году Москва принимала у себя Олимпийские игры.

По специальному заказу оргкомитета Игр Рижский автомобильный завод (РАФ) изготовил для Москвы 300 микроавтобусов. Такое количество машин РАФ обычно выпускает за неделю, но это был случай особый: пришлось потрудиться подольше.

Для автопоездов, которые должны были курсировать на медленном ходу по Олимпийской деревне, для сопровождения участников марафонского бега и спортивной ходьбы и для многого иного авто с обычным бензиновым двигателем не годились: выхлопные газы не должны были мешать спортсменам.

Олимпийские электромобили, что это? Прихоти сервиса или знамение времени? Скорей всего, второе: медленно, робко, но, видимо, неотвратимо на планете начинается электромобильный ренессанс.

По сути, судьба электромобиля до странности схожа с судьбой топливного элемента. И тот и другой, существовали еще тогда, когда не было ни развитой теплоэнергетики, ни двигателей внутреннего сгорания; и тот и другой сейчас настойчиво требуют себе места под солнцем.

Добавим еще: судьбы того и другого — в руках электрохимиков.

НЕЧИСТОЕ ДЫХАНИЕ ПЛАНЕТЫ

Уже гуляет по свету анекдот о горожанине, «объевшемся» на загородной прогулке кислорода; чтобы он пришел в себя, его кладут под выхлопную трубу автомобиля.

Черный юмор, за которым стоят довольно красноречивые цифры. Тысяча автомобилей с карбюраторным двигателем в день выбрасывают около 8 тонн окиси углерода, 200—400 килограммов других продуктов неполного сгорания бензина (среди них и канцерогены), 50—150 килограммов окислов азота.

А ведь сернистый газ, окись углерода и азота — это опаснейшие ядовитые газы: человек умрет через полчаса, если в воздухе будет лишь 0,1 процента окиси углерода.

Говорят: земной шар — это «одиноко несущийся в космическом пространстве автомобиль без выхлопной трубы». Сравнение образное, но невеселое. Котельные, химические заводы, автомобили загрязняют воздух, которым мы дышим.

Дело зашло так далеко, что уже поговаривают о печальной альтернативе: «Либо люди сделают все возможное, чтобы в воздухе стало меньше дыма, либо дым сделает так, что на земле станет меньше людей...»

Заменить авто с двигателем внутреннего сгорания на что-то иное, более приемлемое для биосферы,— вот чем озабочены ученые и инженеры во всем мире. Заменить, но чем?

Соляромобиль? Солнечный автомобиль, в его крышу вмонтированы фотоэлементы, запасающие энергию излучения в виде электричества. Такие устройства уже смонтированы в Японии и ФРГ. Они страшно дороги, это всего лишь игрушка для изобретателей.

Тепломобили? Советский инженер А. Н. Малинин предлагает запасать электроэнергию в тепловых аккумуляторах. Сделать нечто вроде паромобиля, когда-то «жившего» на земле и поедавшего дрова и уголь. Но и эти теплокары не вызывают нигде особого энтузиазма.

Водородомобиль? Кормить авто не бензином, а водородом? В 1980 году в Харькове появилась первая «водородная колонка». Харьковчанин сел в обычное такси, проехал весь город, не догадываясь, что двигатель этой машины работал не на чистом бензине, а на его смеси с водородом. Только водород «заливали» не в бак, а в специальный «аккумулятор», где он немедленно «связывался» металлическим порошком, который прочно удерживал газ и делал его абсолютно взрывобезопасным. Во время движения авто водород в строгой дозировке, контролируемой приборами, вместе с бензином подается в камеру сгорания. Это позволяет более чем на одну треть

сократить расход бензина и резко снизить содержание вредных веществ в выхлопных газах. Новинка разработана учеными Института проблем машиностроения Академии наук Украины и Харьковского автодорожного института.

Другой путь — это хотя бы частично укротить ядовитые выхлопы и сохранить традиционный автомобиль с помощью катализаторов для дожигания газов.

...Дизельный мотор, извлеченный из нутра автомобиля, чем-то напоминает огромную рыбу, вытащенную на песчаный берег. Запущенный на полную мощность, он содрогается и вибрирует.

А исследователей интересуют в данном случае не эти его конвульсии и рев — они «колдуют» с отработанными газами двигателя. Выхлопные газы, проходя сквозь специальную, наполненную катализаторами насадку, теряют свою смертоносную силу.

Такие будничные стендовые испытания автор однажды наблюдал в Алма-Ате, в Институте органического катализа и электрохимии Академии наук Казахстана, которым руководит академик Казахской АН Дмитрий Владимирович Сокольский.

(В 1937 году, закончив МГУ, защитив кандидатскую диссертацию, Дмитрий Сокольский, молодой ученый-химик, сын большевика-подпольщика, приехал в Алма-Ату. Тогда-то и зародился катализ в Казахстане. Так возник один из крупнейших центров органического катализа в нашей стране — школа Героя Социалистического Труда академика Д. В. Сокольского.)

Рассказывает ученица Сокольского, доктор химических наук Нина Михайловна Попова:

— Первые катализаторы для дожигания окиси углерода в безвредный углекислый газ, для превращения окиси азота в инертный азот были предложены за рубежом в 1960 году. На платине. Наш институт разработал гораздо более дешевые катализаторы на менее дефицитном металле. И его-то в наших катализаторах немного: 0,05 процента по весу. Можете представить, какая экономия будет, скажем, на миллионе машин...

Цикл из пяти монографий (их главная сквозная тема — новые катализаторы для дожигания автомобильных и промышленных газов, авторы Д. В. Сокольский и его ученики) удостоен Государственной премии Казахской ССР.

И все же дожигание не может дать радикального решения автомобильной проблемы: бензин-то все равно придется жечь.

Нет, пора нам вспомнить про электромобиль.

Первыми авто — об этом как-то забывают — были электромобили. Электроэкипаж Раффарда появился на несколько лет раньше первой автоколымаги Даймлера.

Забылось и то, что первый автомобиль, который превысил рубеж скорости 100 километров в час, работал на электрической энергии. Он назывался «Всегда неудовлетворенный». Произошло это в 1899 году.

В Петербурге уже в 90-е годы прошлого века громыхал по булыжнику электроомнибус конструкции И. В. Романова. Он вмещал 17 пассажиров, имел 4 ведущих колеса и питался от свинцовых аккумуляторов, расположенных под сиденьями.

В начале нашего столетия маленькие электрические каретки лихо сновали по улицам крупнейших городов мира. В 1900 году электромобилей насчитывалось в 2 раза больше, чем машин с бензиновым мотором.

Ошибочно считается, что, подобно динозаврам, электромобиль исчез внезапно. Это вовсе не так.

В 20-х годах в США эксплуатировалось около 15—18 тысяч аккумуляторных автомобилей. Бегали они по дорогам мира и позже — в 30—40-х годах.

Да, собственно, электромобиль никогда и не исчезал.

Год 1982-й стал в нашей стране датой серийного выпуска электромобилей (их должны поставлять 4 завода). В столице создано первое автохозяйство, в составе которого — 25 электрогрузовиков (к концу пятилетки их будет 400).

Однажды зимним днем, когда термометр показывал 20 градусов ниже нуля, два московских журналиста отправились вместе с водителями электромобиля в обычный рейс. Они убедились: мороз таким машинам не страшен. Ночью они ночуют в теплом гараже, а днем в работе сами себя обогревают.

В кабине тепло и непривычно тихо. На приборной доске — вольтметр: по нему легко определить запас хода.

Управлять машиной нетрудно: всего две педали — педаль ускорения и педаль тормоза. Ведь сцепления и коробки передач в электромобиле нет. Не нужны ему ни

карданный вал, ни дифференциал. После остановки у светофора он быстро и легко набирает скорость.

Водитель, отмечают журналисты в своем репортаже, пока машину загружают коробками с завтраками для школьников, включает шнур в розетку для подзарядки аккумуляторов. Это — вместо бензоколонки.

Одной такой заправки достаточно для 40-километрового рейса. А такое расстояние — больше половины обычного дневного пробега машин, обслуживающих, к примеру, магазины города.

Такой электромобильный транспорт наиболее эффективен в крупных городах при перевозке мелких партий груза. Фургончики грузоподъемностью полторы тонны или немного более незаменимы там, где приходится делать много остановок, маневрировать в сплетении улиц.

Электромобили на улицах все еще редкость, поэтому непросто сравнивать их с обычным авто. Даже сравнение по кпд (у обычного автомобиля в среднем 10 процентов, у электромобиля, как считается, может быть 65 процентов и выше) мало о чем говорит.

Рентабельность? Электромобили только начали внедряться, а авто, работающие на бензине, выпускаются миллионными сериями. Конечно, электромобили должны быть дороже.

Но тут можно вспомнить много примеров из истории техники. Возьмем самый, пожалуй, близкий: когда начали делать фюзеляжи самолетов из алюминия, шутники предлагали, как известно, заменить этот металл банкнотами: алюминий был тогда дорогим, а дерева сколько угодно! Шутка забылась, потому что довольно скоро человечество научилось выпускать уже без особых затрат прочные и надежные алюминиевые сплавы...

СЕРДЦЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Обычно молчаливо предполагается, что энергию электромобилю сообщает аккумулятор. И ничто иное.

Если вспомнить еще о неравномерности потребления электроэнергии, то опять же аккумуляторный электромобиль был бы очень кстати. Весьма привлекательно было бы запасать для транспорта энергию малозагруженных по ночам электростанций, чтобы днем использовать ее в электромобилях.

Поговорим, однако, об аккумуляторах подробнее.

Однажды автору довелось побывать в Саратове. И наблюдать там все процессы, сопровождающие изготовление аккумуляторов.

Вот оператор нажал на кнопку, и стальная гусеница пришла в движение. Перед глазами замелькали металлические стержни, но уследить за отдельными операциями, которые выполнял автомат, было просто невозможно.

Мне демонстрировали конструкторское чудо. Механизировать сборочные операции в машиностроении удается обычно с трудом, а тут 22 ротора, соединенные в слаженный ансамбль, без вмешательства человека могут выдавать готовые аккумуляторы.

К тому же автоматическая линия АРТ-1 сама контролирует свои действия: при малейшей заминке на аварийном табло зажигаются сигнальные лампочки.

А какая скорость! Четыре такие линии, созданные учеными и конструкторами Саратовского научно-исследовательского института химических источников тока (НИИХИТ), способны заменить целый завод по производству щелочных аккумуляторов.

АРТ-1 занимает около ста квадратных метров площади, обслуживает ее всего лишь один оператор и трое рабочих. Традиционный завод — это целая цепочка цехов со множеством людей. Взять хотя бы изготовление электродов — важнейшей детали аккумуляторов. Прежде в НИИХИТе над этой операцией трудилась бригада из четырех человек. Один взвешивал электродную массу, другой засыпал ее в форму и разравнивал, третий прессовал, четвертый контролировал готовое изделие. За смену успевали сделать максимум тысячу электродов. А блок роторов АРТ-1 выдает тысячу электродов за полчаса.

Создать дешевый, легкий, надежный и пригодный для массового выпуска щелочной аккумулятор, автоматизировать процесс их производства — проблема огромной важности. Она в значительной мере решена учеными и конструкторами НИИХИТа.

Передо мной лежат как память о тех днях изящные металлические изделия размером с детскую ладошку. В миниатюрную «тарелочку» с перфорированным дном впрессовывается активная масса электродов. Вот и они: сероватый — никелевый, фиолетовый — железный, коричневый — кадмиевый. Эти «таблетки», разделенные тончайшими, пропитанными электролитом пористыми прокладками толщиною в сотню микрон, укладываются

в стопку одна на другую. Основа аккумуляторной батареи готова.

Саратовская новинка прошла серьезную проверку. «Таблетки» испытывали на электромобилях и тракторах, троллейбусах, на объектах связи, в автохозяйствах.

«Таблеточные» аккумуляторы запатентованы в целом ряде промышленно развитых стран.

Рассказывает Лев Столяренко, кандидат технических наук, руководитель работ по источникам тока для электромобилей (НИИХИТ):

— Говорят так: аккумулятор — сердце электромобиля. Сравнение, может быть, не самое оригинальное, но верное. Сердце это должно быть, естественно, крепким и выносливым. Сейчас судьба электромобилей зависит именно от таких аккумуляторов. Шасси, двигатели, система регулирования — все это есть, но пока нет еще идеального аккумулятора с удельной мощностью 200 ватт на килограмм веса — это параметры двигателя внутреннего сгорания. У наших «таблеточных» никель-железных аккумуляторов мощность в 4—5 раз ниже...

НЕВИДИМЫЕ МИРУ СЛЕЗЫ

Современный автомобиль с одной заправкой бензобака проходит 400—500 километров. Электромобиль на аккумуляторах — 50—80. Заправка автомобиля занимает пять минут. Заправка аккумуляторов электромобиля — несколько часов. Автомобиль может идти со скоростью 160 и более километров в час, электромобиль — на сто километров меньше.

Перевес явно на стороне автомобиля.

Но скажите, какая в современном большом городе реальная скорость (светофоры, погрузка, разгрузка...)? Не так уж и велика.

Стало быть, если исходить из городских условий, то одно из преимуществ автомобиля перед электромобилем перестает играть существенную роль. Зато преимущество электромобиля (не загрязняет атмосферу!) было бы особенно ощутимым, если бы вдруг электромобили, которых сейчас мало, поменялись местами с автомобилями, которых развелось уже слишком много.

К сожалению, это «вдруг» произойдет, видимо, не так скоро.

В ФРГ провели экономический обсчет цепочек пре-

образования энергии: начиная с ее источника до получения полезного эффекта. И вот какие получили кпд.

Первая цепочка: каменный уголь или ядерная энергия — электричество — контактные провода — электротранспорт (троллейбусы, трамваи) — 6,5 процента. Вторая: сырая нефть — бензин — автомобиль — 4,2 процента. Третья: уголь, ядерное горючее — электричество — аккумуляторные батареи — электромобиль — два процента.

Получается (конечно, кпд не единственный показатель; строго говоря, надо было бы провести более полное системное сравнение), что электромобиль с аккумуляторами самый расточительный вид транспорта!

Сейчас у нас в стране изучением электромобильной проблемы занимается множество организаций. Но аккумулятора, способного конкурировать с бензобаком, все еще нет.

Свинцовый (кислотный) аккумулятор был изобретен французом Г. Планте еще в 1860 году. Аккумулятор щелочного типа в 1900 году предложил Т. Эдисон.

Минули многие десятилетия. Во многих странах изобретатели и исследователи пытались всячески усовершенствовать аккумуляторы, но преуспели в общем-то мало.

Первые аккумуляторы имели энергоемкость 15 ватт-часов на килограмм веса, лучшие современные аккумуляторы (через сто лет!) — 100 ватт-часов на килограмм веса, а для конкуренции с бензиновыми автомобилями им нужно иметь хотя бы 200 ватт-часов на килограмм веса.

Создается впечатление: аккумуляторному делу не хватает какого-то революционного скачка, неких радикальных мер, чего-то равнозначного, скажем, введению гидрофобизированных пористых электродов в топливном элементе. Активная масса в аккумуляторах пориста, но, видимо, высокие удельные поверхности здесь используются еще недостаточно умело.

А теперь о «невидимых миру слезах». О трудностях, связанных с эксплуатацией аккумуляторных батарей.

В технике мелочей нет. Известно, в аккумуляторы надо периодически доливать электролит. Резиновые сапоги, рукавицы, фартук, на лице — защитная маска, очки — вот доспехи рабочего, выполняющего эту операцию.

В одной аккумуляторной батарее может быть до сотни элементов. Значит, сто раз надо открыть крышку

и нажать на ручку дозировочного пистолета. Одна батарея — два часа вредной и утомительной работы. К тому же, вручную залить равномерно аккумуляторы не удается. Мало залил — пластины частично обнажены, аккумулятор не отдает нужную емкость. Перелил — того хуже: коррозия корпуса, никелевый электрод чересчур разбухает, возникшее незапланированное давление может искорежить стопку электродов...

Сознавая эти трудности, ученые НИИХИТа автоматизировали заливку электролита в свои «таблеточные» аккумуляторы.

Но, допустим, все операции будут механизированы, тогда все будет в порядке? Еще нет.

Даже при небольших наклонах авто часть пластин в аккумуляторной батарее выступает из электролита, и это портит аккумулятор, сокращает и без того недостаточно длинный срок его службы.

На жизнеспособности батареи сказывается и многое другое: и перезаряд, и недозаряд, и недостаточный уровень электролита (а вода в нем непрерывно испаряется), и его неодинаковая плотность в разных элементах батареи, и пагубный контакт электролита с воздухом (углекислота, попадая в щелочь, карбонизирует, портит его), и т. д. и т. п.

Мы ругаем авто за рев, за шлейфы газа из выхлопной трубы, но забываем, что тишайший аккумулятор имеет свою далеко не безвредную для окружающей среды «химическую выхлопную трубу». Она особенно активизируется при зарядке аккумуляторов — это хорошо известно всем, кому хоть раз довелось заниматься таким делом.

При неизбежном побочном процессе электролиза в аккумуляторе выделяются газообразные водород и кислород, прихватывающие с собой (и уносящие в воздух) пары щелочи или кислоты. Получается взрывоопасная и очень токсичная для дыхания смесь.

Посему и по другим причинам заряд нельзя вести без присмотра аккумуляторщика (работа и ночная и вредная). И делать это надо в особых помещениях: с толстыми стенами, во взрывобезопасном исполнении, с принудительной вентиляцией, с помещением для получения дистиллированной воды. Также нужен склад химикатов и запасных элементов...

Бензобак — конструкция практически безотказная, служит, пока машина не развалится. А аккумуляторы,

после того как они отработали положенное им число циклов, надо менять.

Итак, автомобиль или электромобиль? Конечно, электромобиль. Но пока он не в состоянии вытеснить своего более твердо стоящего на колесах рычащего и дымящего собрата. И не очень ясно, сможет ли он это сделать, если исходить из того, что он должен быть аккумуляторным. Вот потому-то, не предавая аккумуляторы анафеме, было бы неплохо вспомнить и о других вариантах, предлагаемых электрохимией.

В ДОБРЫЙ ПУТЬ, ЭЛЕКТРОБУС!

На первый взгляд машина как машина. Сзади вроде бы обычная выхлопная труба, из нее тянет дымок. Однако, оказывается, это не ядовитые выхлопы, а безобидный водяной пар.

Второе, что удивляет,— машина не издает никакого звука, не фырчит, не тарахтит, бесшумна, как сова.

На дверце кабины начертана формула водорода, а так машина ничем не отличается от любого из рижских «рафиков».

Заглянув внутрь машины, невольно ищешь батарею аккумуляторов, а ее, если не считать стартерной никель-цинковой, нет. Вместо нее — «ящик» размером примерно с две домашние стиральные машины. Это и есть 10-киловаттный электрохимический генератор на топливных элементах. От него ток поступает к двигателю.

В электромобиле на топливных элементах заливать горючее и окислитель не надо. Баки с горючим заменяет газовый баллон с водородом; специальный прибор показывает водителю, сколько водорода осталось на борту. А окислитель — обычный атмосферный воздух, очищенный особым образом.

«Сердце» этого авто создано во Всесоюзном научно-исследовательском институте источников тока (ВНИИТ), руководители работ член-корреспондент АН СССР Н. Лидоренко, профессор Г. Мучник, инженер З. Каричев. Они назвали свое создание — «Исток».

Баллоны с водородом помещены в специальном отсеке, устроенном с внешней стороны «рафика», чуть поодаль от кабины. Все же остальные части ЭХГ надежно спрятаны от постороннего глаза.

Вес ЭХГ в сравнении, скажем, с батареей свинцовых аккумуляторов не очень велик. Это одно из важных достоинств топливных элементов — их низкая металлоемкость конструкции. Удельная металлоемкость водородно-воздушных ЭХГ в 100 раз меньше, чем у гальванических элементов, и в десятки раз меньше, чем у свинцовых или щелочных аккумуляторов. А ведь масса свинцовых аккумуляторов, к примеру, должна быть прямо пропорциональна дальности пробега и порой может составлять более половины массы электромобиля.

В 1980 году электромобили на топливных элементах успешно прошли дорожные испытания. И в условиях, близких к дорожным, на стендах с частыми запусками и остановками, циклическими нагрузками, перепадами температур (включая и очень отрицательные) «Исток» доказал, что он способен обеспечить 100 тысяч километров пробега. Его создатели надеются увеличить ресурс в три-четыре раза.

Оснащенный ЭХГ электромобиль может пройти без подзаправки водородом до 150 километров. А замена баллона с газом требует самое большее 15 минут.

Напомним: кислотным аккумуляторам нужно для подзарядки 20 часов. Даже совершенные саратовские «таблеточные» аккумуляторы можно зарядить только за час.

Лучшие ЭХГ сейчас имеют удельный вес 5 килограммов на киловатт — такой же, как у дизельного двигателя. Основной помехой до сих пор оставалась дороговизна топливных элементов: в их электродах обычно используют редкие и драгоценные металлы — платину, серебро (в небольших количествах).

Но вот расчеты показывают, что перевозки на автомобилях с ЭХГ будут лишь на 40 процентов дороже, чем на машинах с бензиновым двигателем.

Конечно, баллоны с топливом тяжеловаты. В баллоне весом 70 килограммов можно хранить всего четыре—пять кубических метров водорода. Но, во-первых, существует уже криогенная техника хранения водорода и есть сплавы, способные поглощать (абсорбировать) громадные количества газа. А во-вторых, если думать о внедрении в серию, то электромобили надо прежде всего делать грузовыми. Хотя легковых машин очень много и считается, что это стало подлинным бедствием, все-таки они загрязняют атмосферу меньше, чем, скажем, автобусы. Легковой автомобиль за день сжигает в среднем 15 лит-

ров бензина, а автобус — 200. Да и работает он, словно муравей-труженик: непрерывно! Легко прикинуть, кто больше надымит. Поэтому с экологической точки зрения лучше бы прежде всего заменить электромобилями городские пассажирские автобусы. А тут проблему «заправки» топливом решить много проще.

Руководствуясь этими соображениями, внииТовцы вместе с коллегами из Венгрии приступили к работе, конечная цель которой — создание городских маршрутных электробусов на базе «Икаруса». Оснащены они будут советскими ЭХГ.

Принципиальных трудностей в деле создания электромобиля на топливных элементах нет. Первые образцы построены, и их надо лишь совершенствовать: найти замену дорогостоящим катализаторам, увеличить срок службы, эффективность, надежность.

Все это будет сделано, если возникнет жизненно острая необходимость в бесшумных, экологически безвредных, простых в управлении и в технологии обслуживания, экономичных электромобилях.

В добрый путь, водородный электробус!

Глава 9,

о Большой энергетике и о месте в ней топливных элементов — реальность и перспективы

Рядовые энергетики

В беге не всегда выигрывают быстрые, в битве не всегда побеждают сильные, но ставку принято делать именно на них.

Раньен

Вот небольшая заметка, выхваченная из бурного потока печатной информации (газета «Фэйнэншл таймс», Лондон):

«Японская автомобильная компания «Судзуки мотор» провела испытания бензина, полученного из ... мандариновой кожуры... При сгорании он выделяет не едкий чад, а сладковатый фруктовый запах. Все было бы хорошо, но для получения одного литра такого мандаринового бензина требуется кожура от 11 тысяч мандаринов!»

Если бы на Марсе жили мыслящие существа и у них была возможность, не вмешиваясь, наблюдать нашу жизнь, некоторые факты нашего сегодняшнего дня их бы очень удивили.

В самом деле, создав гигантские, мощнейшие ТЭС, ГРЭС, АЭС, земляне вдруг вспомнили... о ветряных мельницах!

Не память о легендарном сражении Дон Кихота с ветряными мельницами заставила испанских инженеров вспомнить про эти древние устройства.

Марсианскому Нестору было бы над чем поразмыслить. Ведь многие новинки наших лет имеют отчетливый привкус «ретро».

В ФРГ полеты между главными городами страны совершают самолеты с винтовым двигателем. В Нью-Йорке вдруг вспомнили о троллейбусе. В Великобритании проявляется интерес к локомотивам с паровым двигателем.

Говорят, серьезно подумывают даже о возвращении водяного колеса, устройства, которое было широко распространено по всей Европе начиная примерно с 1000 года и затем повсеместно и надолго забыто.

Но, вероятно, более всего летописцев-инопланетян заинтриговало бы возвращение паруса.

В нашей памяти парус — это каравеллы Колумба, это лихие схватки с пиратами, это романтические дали, времена, когда еще многое зависело от силы ветра и крепости парусов.

И вот на морях ветер снова надувает паруса. А в небе неожиданно снова появились дирижабли, хотя, казалось бы, после взрыва в 1937 году гиганта «Гинденбурга» они должны были исчезнуть навсегда. Но нам говорят: это не те дирижабли, не те парусники, не те ветряные мельницы. Действительно: старинные ветряки стали теперь ветроэлектрогенераторами. А на японском танкере, спущенном на воду в 1980 году, привычные паруса заменил стальной лист специальной конструкции. Движением современных «бригантин» управляют ЭВМ. Они рассчитывают силу и направление ветра, управляют парусным оснащением.

Все так: отличие очевидное и несомненное. И все же

трудно вот так сразу освободиться от чувства какой-то неловкости, что ли: от чего ушли, к тому и пришли... Увы, «ретро», если иметь в виду энергетику, не просто прихоть моды, возврат к дирижаблям или парусам — это на самом деле поиск путей преодоления уже назревших или еще только назревающих энергетических и экологических трудностей.

Замечательный советский физик лауреат Нобелевской премии академик Петр Леонидович Капица в многочисленных докладах и статьях неустанно пропагандировал следующий взгляд на энергетику.

Энергией, утверждает Капица, землян могут обеспечить лишь делящийся атом или термоядерный синтез. Остальные источники (Капица проводил соответствующие физические подсчеты) не могут решить энергетической проблемы. Ибо они слишком маломощны — мала удельная интенсивность потока энергии.

Капица считал: ни тепло недр или океана, ни солнечная радиация (Солнце посылает на квадратный метр всего 100 ватт), ни ветры, ни приливы не насытят энергетические потребности землян. И казалось бы, заниматься подобными проектами — пустая трата времени и средств.

Физические выкладки академика безукоризненны, аргументация его изящна и убедительна. Однако энергетическая практика последнего времени идет своим путем.

На Камчатке действует первая в стране экспериментальная Паужетская геотермальная электростанция, сокращенно ГЕОТЭС, мощностью в пять тысяч киловатт. Она уже выработала сотни миллионов киловат-часов электроэнергии.

А в Крыму в 1985 году должна войти в строй первая в стране опытно-промышленная гелиоэлектростанция.

Госплан СССР, утверждая совместно с Госстроем СССР технико-экономическое обоснование строительства солнечной электростанции, прекрасно отдавал себе отчет в том, что себестоимость электроэнергии, которую начнет вырабатывать Крымская СЭС, составит 1,5—2 рубля за киловатт-час. Дороговато? Безусловно. На ГЭС в среднем по стране (данные 1979 года) стоимость электроэнергии в тысячу раз меньше — 0,149 копейки.

О многом пришлось бы призадуматься марсианину, если бы он в порядке, скажем, обмена опытом вздумал посетить Землю.

Что же происходит с энергетикой? Откуда дуют эти ретроветры? Отчего не внемлют доводам физика? К чему проявлять расточительность при явной нехватке?

Во всем этом хотелось бы разобраться.

ЭНЕРГОЭКС-ВЛАДЫКИ

Лет восемьдесят назад, с началом электрической эры, главным топливом был уголь. «Король-уголь» называли его тогда.

Но единовластие длилось недолго. Очень скоро уголь потеснили «принцесса-нефть» и еще позднее «принц-газ».

К 1980 году эти энергетические властелины так поделили свою власть (в процентах): нефть — 45, уголь — 25, газ — 19. Суммарно (89 процентов) углеводороды доминируют. Но уже сейчас можно предсказать, без особой боязни ошибиться, что это всего лишь сборище временщиков. И что энергетический трон может вскоре оказаться без владыки.

Возвышение нефти было стремительным. В 1860 году во всем мире добывалось только 72 тысячи тонн нефти, а в 1980 из земных недр выкачали уже 3064,4 миллиона тонн. В десятки тысяч раз больше.

Ясно, подобный «взрыв» нефтедобычи не может продолжаться бесконечно. По мнению западных футурологов, в 2010 году должна разразиться общечеловеческая катастрофа — запасы нефти подойдут к концу.

Заметим, кстати, что многие капиталистические державы уже пережили свой максимум в нефтедобыче. Для США, например, это были 60—70-е годы.

Оставляя точность сроков на совести пророков, согласимся, однако: запасы нефти не безграничны. И засилье нефти в энергетике — дело безусловно временное.

А почему бы не вернуться к углю? Ведь его запасы все еще велики. Да, такой вариант возможен. Больше того, он уже осуществляется. Но ведь запасы угля тоже не безграничны. Да и обычное его использование — жечь в топках — не очень радует экологов.

Экология. Это слово ворвалось в жизнь людей стремительно, шумно, с обвинениями, попреками, мрачными прогнозами о будущем планеты. Наибольшую сумятицу экология внесла в мышление энергетиков. Многие энергетические технологии были поставлены под сомнение. Особенно досталось углю. На него (а также нефть и дру-

гие углеводороды) было составлено обвинительное досье. С угрожающим названием: «Индекс стресса и ранг опасности различных загрязнений для биосферы».

Стресс. Еще одно расхожее словечко. Его ввел в науку канадский физиолог Ганс Селье. Термин этот характеризует перенапряженность жизни современного человека.

Экологи сделали следующий смелый шаг — они вывернули термин наизнанку. Применили понятие стресса к воздействию человека на окружающую среду. И попытка оказалась продуктивной — появилась возможность ввести меру «давления» техногенных факторов на природу. Так возник «индекс стресса», и на его основе была составлена таблица, в которой отнюдь не почетные первые места (ранги) занимают загрязнения, возникающие при сжигании угля.

Кажется, мы переживаем «смутные» в своем роде времена: уголь, нефть и газ как источники энергии, поскольку они относятся к невозобновляемым, должны, по всей видимости, уступить место каким-то другим. Каким же?

«ДА» И «НО» АТОМА

Атомная энергетика быстро прошла стадии (первая в мире АЭС — мы не можем этим не гордиться! — заработала 27 июня 1954 года в городе Обнинске под Москвой) детства и юности. На все это ушло всего каких-либо три десятка лет. Теперь, вероятно, наступает пора зрелости Развитие атомной энергетики у нас в стране после XXVI съезда КПСС стало существенной частью Энергетической программы. Запланированы атомные электростанции прежде всего для европейской части Советского Союза, где традиционные источники энергии практически уже исчерпаны.

Первые атомные электростанции дались непросто: во-первых, это была «езда в незнаемое», а во-вторых, они создавались на обычных машиностроительных предприятиях, на тесных, мало приспособленных для этого площадках, с помощью оборудования, тоже не слишком подходящего для таких целей. Потому-то и было принято решение о строительстве специального завода, на котором производство атомных реакторов вместо «езды в незнаемое» должно превратиться в точную, размеренную, высокорентабельную, а главное — научно обоснованную и экспериментально уже проверенную работу.

Сейчас в СССР действует девять АЭС, а строительство новых станций ведется уже на 16 площадках. Заявка серьезная. Атом берет разгон.

У нас в стране при строительстве и эксплуатации атомных электростанций соображения полнейшей безопасности ставятся во главу угла. Никакого вреда ни людям, ни природе! И опыт эксплуатации уже дающих промышленный ток АЭС доказывает: это возможно.

Можно ли утверждать, что у атомной энергетики нет никаких «но», что все проблемы здесь решены и ни о чем задумываться не следует? Нет, горизонт над атомной энергетикой не такой уж безоблачный. Так, до сих пор не найден оптимальный ответ на вопрос: куда девать те радиоактивные продукты, радиоактивные шлаки, которые образуются в результате работы атомных реакторов? Да и само ядерное топливо тоже ведь исчерпаемо. Существуют подсчеты (правда, не очень достоверные) его земных запасов. Именно поэтому и по ряду других причин будущее энергетики связывают с решением необычайно сложной в техническом отношении задачи — научиться управлять синтезом легких ядер, термоядерным синтезом, или, в просторечии, термоядом. Эта проблема давно разрешена природой. Солнечный реактор работает уже около десяти миллиардов лет. На Солнце плазму в узде держат силы тяготения. Чем их заменить в земных условиях?

В 1950—1951 годах в СССР и одновременно в США была высказана ставшая ныне широко известной мысль — использовать для удержания плазмы магнитное поле. Казалось, термояд вскоре удастся запрячь в энергетическую упряжь.

Не тут-то было! Советский академик Лев Андреевич Арцимович, создатель легендарных «Токамаков», проложивших путь бурному прогрессу в этой области, недаром любил повторять такую присказку: «Термоядерная энергия — это одноколесный велосипед: все знают, что теоретически на нем можно ездить, но на практике все падают».

Вот уже три десятка лет сражаются с термоядом физики всей планеты. Эксперименты с мощными электрическими разрядами дали отрадные результаты: были зарегистрированы нейтроны, возникшие в ходе ядерных превращений. Вспышка энтузиазма, вызванная этим событием, хорошо показана в фильме М. Ромма «Девять дней

одного года». Скоро выяснилось: плазма неустойчива, быстро разваливается, термоядерный синтез останавливается.

Аналогия тут такова. Представьте себе, что вы пытаетесь, держа в руках упругий стержень, сжать его вдоль оси. Очевидно, при достижении некоторого критического усилия стержень изгибается и выскальзывает из ваших рук. То же происходит и с плазмой, сжимаемой магнитным полем протекающего сквозь нее электрического тока.

Физики успешно справились и с этой проблемой. В «Токамаках», этих магнитных «бубликах», ток, текущий по наполненной водородом камере, ионизирует, греет и удерживает плазму от контакта со стенками, а сильное поле вдоль линий тока обеспечивает его устойчивость.

На советских «Токамаках» получена и исследована плазма с рекордной температурой — 70 миллионов градусов.

Но нужны, кроме того, высокая плотность плазмы и достаточное время ее удержания. И еще, чтобы утечки энергии и частиц из плазмы не превышали некоторого уровня, определяемого темпом выделения энергии в ходе термоядерной реакции.

Короче, нужно, чтобы энергии выделялось больше, чем потреблялось.

Пережив несколько периодов мрачного уныния и бурной радости, склонные к самоиронии физики сформулировали две шутливые теоремы.

Произведение оптимизма на знание есть величина постоянная. Так что, по мере накопления знаний оптимизм должен уменьшаться.

Святыня термояда окружена со всех сторон одинаково высокой стеной. Если представителям нового направления кажется, что с их стороны в стене имеется брешь, то это свидетельствует лишь о юности данного направления...

Трудности термояда настойчиво требовали международного сотрудничества ученых.

В 1956 году академик И. В. Курчатов взял на себя инициативу рассекретить эти исследования (до этого они везде велись под цифрами и кодовыми названиями, в глубокой тайне). Он выступил с открытой лекцией на эту тему в Харуэлле (Англия).

Эту инициативу продолжил в 1978 году академик Е. П. Велихов. Он предложил ученым других стран взяться за международный проект опытного термоядерного реактора — токамака ИНТОР.

В ИНТОРе будет периодически зажигаться и затем сама поддерживаться в течение 200 секунд дейтериево-тритиевая термоядерная реакция. Ее тепловая мощность составит 620 мегаватт.

И все же ИНТОР — это еще далеко не термоядерная электростанция, а лишь дальние подступы к ней.

В 1970 году отмечалось 75-летие Игоря Евгеньевича Тамма, одного из отцов советского термояда. Юбилей был преимущественно шуточный, иначе бы юбиляр отказался в нем участвовать. Его устроители — аспиранты Тамма, ученики и соратники, друзья физики.

Было веселое действо, карикатуры на метра, традиционный капустник. Пелись и такие знаменательные частушки:

Говорят, говорят, скоро будет термояд.
Будет мирный, будет смирный, управляемый.
Нам об этом термояде говорили в детстве дяди.
Говорят, говорят, скоро будет термояд!
А теперь мы сами дяди, сами то же говорим
И мечтой о термояде все горим, горим, горим!

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КАННИБАЛИЗМ

Наука и техника не видят предела развитию энергетики, хотя это вовсе не означает, что никаких ограничений нет. Они существуют. К примеру, человек умеет производить хороший и чистый газ и бензин из угля. Но строительство подобных предприятий связано с огромными капиталовложениями. Ведь придется в десятки раз увеличить число шахтеров, понадобится разработать новые методы устранения тех безобразных шрамов, которые шахты наносят земной поверхности, и так далее.

В США подсчитано, что перевод тепловых электростанций с нефти на уголь обошелся бы в триллион (!) долларов. Понятно, что даже для Америки этот процесс потребует десятков лет.

Многое сейчас пересматривается. Возьмем атом. Ведь сколько тут было обещаний. И далеко не беспочвенных: всего один грамм урана (частица размером с булавочную головку) по запасам энергии эквивалентна полутора тоннам высококачественного донецкого антрацита. Потому

от атома и ждали чудес, океана дешевой энергии. Но реальность оказалась несколько иной. Вот данные Минэнерго СССР за 1979 год. Себестоимость электроэнергии на традиционных ТЭС — 0,752 копейки за киловатт-час, а на АЭС даже дороже — 0,786 копейки. И по кпд атомные станции уступают тепловым: 30—32 процента (на лучших ТЭС кпд выше: около 40 процентов).

Почему это так? Очень просто. Атомные станции — это по существу те же ТЭС. Только паровой котел заменен атомным реактором. И получился странный гибрид: что-то вроде телеги (сравнение принадлежит профессору физику А. И. Китайгородскому), которую тянет восьмицилиндровый двигатель. И все оттого, что мы еще не умеем непосредственно преобразовывать энергию ядерного деления в электричество, минуя малоэффективные тепловые стадии.

Когда внедряется новая энергетическая технология, дело попросту упирается во время.

Известный советский энергетик профессор Ю. И. Корякин отмечает удлинение сроков прихода новых энергетических технологий.

Коммерческие реакторы на тепловых нейтронах (отсчет идет от 1954 года) появились примерно через 25 лет. Более прогрессивные реакторы на быстрых нейтронах (в них атомное горючее будет самовоспроизводиться), как полагают, станут коммерческими в середине 90-х годов, то есть уже через 40 лет. Термояд же и вовсе ждут где-то в начале (многие называют 2010 год) второго десятилетия следующего века. Значит, примерно через 60 лет после начала работы над ним.

Подобные закономерности не должны удивлять. Чем больше мы хотим получить от природы, чем больше вмешиваемся в ее суверенные права, тем больше встречаем и сопротивления.

Откровенно по этому поводу высказался академик Е. Федоров: «Ничего не получишь даром, ничто хорошее не может не иметь определенных негативных последствий. И вряд ли разумно стоять на такой позиции: обеспечивай нас, народное хозяйство, всем, чем нужно, делай, что хочешь, но, упаси бог, не затрагивай природу. Это нелепо...»

Месть природы может проявляться самым неожиданным образом. Так, одна вдова из ФРГ подала в суд на хозяев электроцентрали. Она требовала возмещения

материальных убытков. Утверждала, что, когда вблизи от ее ферм была проложена линия электропередачи высокого напряжения, ее коровы стали давать меньше молока.

Дело дошло до суда. Эксперты подтвердили: действительно, электрическое поле вблизи ЛЭП может изменять нормальное функционирование молочных желез у домашних животных.

Мелочи? Как сказать? Ведь за ними проглядывает принцип: энергетическая технология подчиняется, как считают некоторые экономисты, закону уменьшающейся прибыли. Это значит, что каждый следующий шаг в энергетике стоит дороже предыдущего. И следовательно, может наступить момент, когда дальнейшие усовершенствования уже перестанут приносить выгоду.

Грубо говоря, на определенной стадии энергетического прогресса мы будем тратить столько же энергии, сколько рассчитываем получить.

Эти не слишком утешающие воззрения получили название энергетического каннибализма.

В последние годы много говорят об опасности тепловых загрязнений и теплового перегрева планеты. В «Индексе стресса» сейчас тепловое загрязнение фигурирует на одном из первых мест-рангов.

Рост теплового загрязнения, его размеры будут, словно тень, следовать за неуклонно растущей энергетикой землян. И на какой-то черте непременно ситуация станет взрывоопасной. Начнутся климатические катаклизмы.

Некоторые специалисты даже предполагают, что для стабилизации климата придется, возможно, отводить тепло с Земли в космос. Скорее всего, это позволит осуществить дешевая термоядерная энергия. Парадокс! Нам нужна будет энергия для отвода избыточного тепла — энергии же!

СО СВЕЧОЙ... В КАМЕННЫЙ ВЕК?

В 1976 году в США вышла книга профессора Техасского университета Эрла Кука «Человек, энергия, общество». В ней он последовательно рассматривает три возможных варианта будущего развития энергетики мира, рост энергетической мощи, стабилизированное состояние, переход к малому энергопотреблению.

Конечный вывод: мы должны себя готовить к переходу от экономического изобилия к экономике нехваток.

к жесткому контролю и регламентации производства и жизни людей.

«Человек каменного века,— пишет Кук,— жил в достатке, потребляя энергии раз в двадцать меньше, чем мы сегодня. Вполне возможно, чтобы нынешнее богатое общество двигалось в этом направлении. Но для этого нужно будет совершить революцию в мышлении и поведении...»

В качестве утешения Кук напоминает о бенедектинцах, которые-де использовали в своих монастырях технику не для получения прибыли, а чтобы высвободить время для «приносящей удовлетворение» деятельности.

Как отнестись к такой, прямо скажем, мрачной перспективе: вернуться как бы в каменный век и, зажав в руке чадящую свечу, жить, не ведая ни электричества, ни центрального отопления, ни автомобилей, ни всего другого, чего достиг человек?

Ну прежде всего, надо понимать, что Кук вещает со своей, капиталистической, колокольни. А с нее и на самом деле все видится в мрачном свете — и настоящее, и будущее, ибо последствия капиталистического способа хозяйствования на Земле в целом ряде случаев просто ужасающие. Как тут не вспомнить предостережение К. Маркса: «...Культура,— если она развивается стихийно, а не *направляется сознательно*...— оставляет после себя пустыню...»

Человечество не может «развиваться вспять», поэтому призывы к такому развитию — не более чем утопия.

И все же Кук кое в чем прав. «Развиваться вспять», к лучине или к свече человечество действительно не может, но оно — это становится ясно многим ученым — не может в своем стремлении повышать энерговооруженность быть неосмотрительным и неразумно, бесконтрольно и расточительно расходовать ресурсы, в буквальном смысле пускать их на ветер, на обогрев околоземного пространства. Настала пора жесточайшей экономии ресурсов и энергии.

На вечере энергетики в Политехническом музее в Москве академик В. Попков говорил об «энергосберегающей политике». В нашей стране она возведена в ранг государственной — везде потребление энергии рассматривается с точки зрения «функции минимизации», жесткой экономии.

Нет, конечно, мы не должны ходить по темным улицам, зябнуть в холодных помещениях, уходя на работу, съедать холодный завтрак... Не о том речь, а о том, чтобы положить конец расточительству, ничем не оправданной щедрости в расходовании энергии и, значит, топлива, особенно нефти и газа. Разве это по-хозяйски, например, если до 40 процентов тепла, предназначенного для обогрева наших жилищ, тратится практически на обогрев атмосферы? То ли потому, что архитекторы спроектировали дома без учета климатических условий, то ли потому, что строители нарушили технологию, то ли потому, наконец, что мы сами плохо подготовили свое жилье к зиме...

Это только один пример нашего расточительства, а их можно набрать немало. И подсчет энергетических потерь — как неизбежных, так и по неразумению — нельзя ни в коем случае считать крохоборством. К этому нас обязывает забота о собственном будущем, а оно теснейшим образом связано с будущим энергетики. Дело не только в том, чтобы на основе прогрессивных и перспективных технологий производства энергии повышать свою энерговооруженность, но и в том, чтобы научиться экономно и разумно распоряжаться добытой энергией.

Какое отношение наше энергетическое мини-обозрение имеет к теме книги, то есть к электрохимии и ее любимому дитяти — топливным элементам? Думается, самое прямое. Топливные элементы, как мы помним, обладают такими немаловажными достоинствами, как высокий кпд и экологическая чистота. Выгодны они еще и потому, что необходимое для них топливо, прежде всего водород, можно получать из таких источников, где запасы его практически безграничны,— из воды.

Ныне в энергетике сложилась ситуация, которую можно было бы назвать — конечно, с большой долей условности — перепутьем. Пока не очень-то ясно, какой технологии в обозримом будущем люди отдадут предпочтение. Да и возможно ли, чтобы все свелось к какой-то одной технологии? Широко обсуждаются как традиционные пути развития энергетики, так и те, что существуют пока либо в форме лабораторных экспериментов, либо в форме идей и проектов на бумаге. Все будет решать строгий технико-экономический расчет, основанный на учете целого ряда факторов, каждый из которых может оказаться решающим.

Глава 10,

о топливных элементах, которые как будто бы готовы поселиться в крупных городах

Топливные элементы: с Луны на Землю

Основное занятие ученого состоит в том, чтобы найти, как сделать вещь, а дело инженера — создать ее.

Джон Десмонд Бернал

Создать топливные элементы, потребляющие углеводороды (нефть, горючие газы), электрохимикам пока не удалось. Причины мы подробно обсуждали. Но остаются еще возможности для захода «с флангов и тыла». Простейший обходный маневр — предварительное разложение углеводородов на составляющие и выделение из этой смеси водорода, с тем чтобы это «вторичное топливо» пустить в дело в достаточно отработанных и хорошо проявивших себя в космосе водородно-кислородных топливных элементах.

Эта стратегия электрохимиков, объединившихся с инженерами и технологами, и будет обсуждаться в данной заключительной главе.

В МОСКОВСКОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ

В Советском Союзе топливные элементы давно не новинка. В Москве на стендах ВДНХ демонстрируются электрохимические генераторы тока, ЭХГ. К примеру, на выставке можно увидеть водородно-воздушные ЭХГ для питания переносного телевизора (мощность 15 ватт, срок службы две тысячи часов).

И хотя практические успехи ограничиваются пока созданием ЭХГ небольшой мощности, ученые не перестают думать и работать над проблемами электрохимической энергетики больших мощностей. Вот почему с таким интересом электрохимики страны собирались в сентябре 1979 года на свой очередной форум. Тогда в Москве проходила Всесоюзная научная конференция, главной темой которой была именно электрохимическая энергетика.

Знаменательно, что электрохимики страны собрались в стенах Московского энергетического института (МЭИ),

где уже имеется положительный опыт подготовки специалистов по электрохимической энергетике. Тем самым как бы скреплялся союз электрохимиков и энергетиков.

В первый день работы конференции с докладом выступил декан химического факультета МЭИ доктор технических наук, профессор Н. В. Коровин. Доклад был назван так: «Электрохимическая энергетика и перспективы ее развития». В нем Коровин отметил важное преимущество ЭХГ перед другими электрохимическими источниками тока — на один-два порядка более высокую удельную энергоемкость и меньшую степень использования быстро истощающихся, становящихся дефицитными материалов — цинка, свинца, олова, никеля, серебра...

Конечно, не только об ЭХГ говорилось на конференции. Работали секции «Электрохимические генераторы», «Аккумуляторы», «Первичные источники тока»... Было заслушано более 100 докладов.

На конференции действовала (знамение времени) секция «Водородная энергетика и охрана окружающей среды». О защите жизненно важных для человека биоресурсов Земли говорил в своем выступлении директор ИЭЛАНа профессор В. Е. Казаринов. Проблема эта, подчеркивал он, тесно переплелась с энергетической политикой и стала уже поистине интернациональной. О ней, например, говорилось в Заключительном акте Совещания по европейской безопасности в Хельсинки. А ЮНЕСКО, отмечая важную роль электрохимии в защите биосферы, разработала обширную программу научного сотрудничества различных стран по этому вопросу. В качестве головного научного центра выбран Институт физической химии и электрохимии имени Я. Гейровского Чехословацкой Академии наук...

На конференции в МЭИ было продемонстрировано много примеров того, как ЭХГ постепенно входят в нашу жизнь и быт. Эти устройства снабжали электроэнергией действующий в Черном море подводный дом «Черномор» (Академия наук СССР). У ЭХГ большие перспективы в железнодорожном деле — например, автономные установки для автоматической сигнализации. И так далее.

Конференция в МЭИ показала, что все необходимые предпосылки для создания у нас в стране не только малой и средней электрохимической энергетики (установки от 1 до 10 киловатт), но и большой имеются. Несомненны успехи в изучении электрокатализа, теории сильных

электролитов и в других областях, которые составляют фундамент для быстрого развития электрохимической энергетики.

Не все разделяют надежды, связанные с электрохимической энергетикой, не все настроены оптимистически. Но может быть, уместно провести параллель с историей развития энергетики атомной? Когда в СССР была пущена первая АЭС, это было скромным началом. Первая атомная казалась карликом в стране исполинов традиционной энергетики.

Недавно президент Академии наук СССР академик А. П. Александров вспомнил те дни: «...многие считали, что атомная энергетика — это в общем скорее забава ученых и инженеров и вряд ли найдет когда-либо широкое применение, вряд ли будет конкурентоспособной с энергетикой на обычном топливе — нефти, угле, газе. Теперь так не думают...»

Даже лет 15 назад мечта о «большом атоме» оставалась мечтой, хотя и Белоярская и Нововоронежская станции уже работали на полную мощность. Они звались опытными, потому что атомные котлы и часть оборудования были экспериментальными. И работу их оценивали не столько киловатт-часами, сколько исследованием режимов эксплуатации, необходимых для создания мощных реакторов. Да и среди обслуживающего персонала было больше физиков, чем в ином научном учреждении. Но сейчас можно сказать: атомная энергетика сделала огромный рывок в будущее.

Так начиналась эра энергетики атомной. Она шла по прямой восходящей линии. Пути энергетики электрохимической оказались весьма извилистыми и длинными. Но может быть, именно сейчас она близка к столь долгожданному успеху?

РОЖДЕННЫЙ ДЛЯ ГОРОДА

«Приводят все дороги в Город». Так писал в конце прошлого века бельгийский поэт Эмиль Верхарн.

Города — средоточие нашей цивилизации. Достижения и просчеты здесь особенно рельефны, обнажены.

Для огромного числа людей город с его каменными громадами, заслоняющими небо,— это и есть их планета, вторая природа со своеобразными «климатом».

Город — это «остров тепла». Средняя температура тут из-за огромного энергопотребления, обилия всевозможных установок, машин, приборов, аппаратов, выбрасывающих в виде отходов в атмосферу не только газообразные продукты, но и тепло, наконец из-за жизнедеятельности большого количества людей может на 10 градусов быть выше, чем вне городской черты.

В городе иной воздух, не так светит солнце. В городах-миллионерах, по данным австрийских экспертов, продолжительность светового дня в среднем на час короче, чем за городом; интенсивность ультрафиолетового облучения почти наполовину меньше; сила ветра тут на 20—30 процентов меньше, чем в деревне; туманы наблюдаются вдвое чаще.

В воздухе, которым дышат жители города с населением в миллион человек, в 10 раз больше пыли, в 5 раз больше двуокиси серы, в 10 раз больше углекислоты, в 25 раз больше окиси углерода.

Когда-то города были лишь мишенью для острот. Жан Кокто, французский писатель: «Разница между большим городом и городом маленьким заключается в том, что в большом можно больше увидеть, а в маленьком — больше услышать». Теперь же слышатся нотки горечи. Арнольд Тойнби, американец: «Город, размеры которого превышают возможности пешехода, является настоящей ловушкой для человека».

Во второй половине XX столетия Земля людей с болью в сердце навсегда, видимо, рассталась с идеей «возврата к природе», которую страстно проповедовал Руссо. Увы, города наступают на планету; скажем, в Англии ими покрыто уже около 15 процентов территории.

Как же совместить в городах экологическую чистоту и непрерывный рост энергопотребления? Поначалу казалось, что проблема снимется сама собой, когда тепловые станции перейдут на менее дымящие топлива (природный газ, например) или будут приняты меры по очистке дымовых выбросов. Еще один путь — вынести энергетические объекты за черту города (и подальше!) и передавать электроэнергию в город по проводам.

Проблема, однако, сама собой не снялась. Строительство линий электропередач (тем более дальних) обходится дорого, да и велики потери энергии на пути к потребителю. Очистные сооружения стоят тоже недешево, а менее дымящие топлива невечны — их запасы истощаются.

И тогда вновь вспомнили про топливные элементы. Мы не раз уже говорили, что у электрохимических генераторов есть одно важное достоинство: они экологически чисты. Они выбрасывают в атмосферу почти исключительно углекислый газ и воду. Поэтому их можно использовать непосредственно там, где они нужнее всего,— в крупных городах и промышленных центрах.

Да, топливные элементы как бы рождены для города. Они бесшумны, так как химическая энергия здесь непосредственно преобразуется в электричество, минуя стадию, связанную с механическим движением. Низкотемпературные топливные элементы практически не потребляют воды. Они занимают гораздо меньше места, нежели традиционные тепловые электростанции — ТЭС, а в переуплотненных городах проблема территории крайне остра. Предварительные оценки показывают, что электростанция на топливных элементах мощностью в 20 мегаватт, способная обеспечить электроэнергией жилой массив или город с населением в 20 тысяч жителей, будет занимать участок размером лишь в тысячу примерно квадратных метров, а все ее оборудование может быть размещено в одноэтажном строении.

Причины компактности электрохимических энергоустановок ясны. Отдельный топливный элемент — это как бы сандвич, где роль ломтей хлеба играют два пористых электрода, а кружочки колбасы — пропитанная раствором электролита также пористая матрица. Конечно, один такой электрохимический сандвич энергией не насытит. Тут уже нужна стопка, этакий слоеный пирог из множества топливных элементов.

Толщина отдельного топливного элемента — миллиметры, снимаемая мощность — сотни ватт. Батарея же высотой в несколько метров, из многих сотен отдельных, повторяющихся, однотипных, правильно чередующихся топливных элементов способна дать сотни киловатт энергии. Мегаватты же — если вести речь об электрохимической энергетике всерьез — получатся, когда на сравнительно небольшой площадке взгромоздятся сотни таких слоеных электрохимических колонн. Это и будет (как бы ее назвать?) электрохимической электростанцией (ЭЭС). Одна из многих ячеек электрохимической энергетики (ЭХЭ).

Важное достоинство таких источников энергии еще и в том, что в основе их построения лежит принцип модуль-

ности. Стопку или набор топливных элементов, модуль, можно сделать любого размера, а стало быть, и любой мощности — в зависимости от потребностей.

В каждом доме можно поставить свою котельную, но никак не электростанцию. (Так же как вряд ли в будущем появятся автомобили с атомным реактором.) Это если говорить о традиционных источниках энергии в городе. Не то — ЭЭС. За рубежом обсуждаются уже проекты небольших (от 25 до 200 киловатт) автономных электрохимических генераторов на природном газе (а он есть в каждой кухне), которые бы обслуживали отдельные микрорайоны или даже большие жилые дома. При этом можно утилизировать еще и тепло, выделяемое топливными элементами. И при тех же затратах топлива не только снабжать дома электричеством, но и отапливать их.

Но благодаря модульности можно представить ЭЭС и больших мощностей — от 5 до 25 мегаватт. Однако работа для них в городе будет уже иная.

Ритмы города — «прилив» и «отлив». Часы пик с толчеей в метро и автобусах. Ночью город спит, потребляя мало энергии, но, проснувшись, он в течение дня забирает все, что ему предназначено, а предназначенного уже бывает мало, удовлетворяются далеко не все его нужды.

Энергетика города вынуждена работать очень неравномерно, потребление энергии изменяется не только в течение суток, но и на неделе — простои в субботу и воскресенье, в зависимости от времени года — летом меньше, зимой больше. К тому же, как сейчас увидим, неэкономично. Кто-то остроумно заметил: «Энергия похожа на деньги, ее можно накапливать, но пользу она приносит лишь, когда ее расходуют».

Эффективность использования топлива на ТЭС сильно зависит от нагрузки, а электрохимический генератор независимо от нагрузки потребляет одно и то же количество топлива на производство киловатт-часа электроэнергии. Это тоже замечательное свойство топливных элементов — сколько их мы уже перечислили.

Нетрудно представить, какие можно получить выгоды, если использовать топливные элементы в коммунальном электроснабжении. В первую очередь в качестве вспомогательных генераторов, подключаемых в часы пиковых нагрузок. Учитывая прихотливые ритмы городов, очень выгодной окажется комбинация из ТЭС, рассчитанной на средние, базовые, нагрузки и постоянно ра-

ботающей в оптимальном режиме, на полную мощность, и батареи топливных элементов, принимающей на себя пиковые нагрузки.

Мысль о выравнивании нагрузок в больших энергетических системах: аккумулирование энергии при спадах и выдача ее в сеть при подъемах — мысль старая. Подсчитано, что, скажем, в США создание таких аккумулирующих станций общей мощностью от 200 до 400 миллионов мегаватт сэкономило бы в год 50 миллионов тонн нефти.

Как это осуществить? Способов было предложено много. Можно сжимать воздух, хранить его, например, в пустотах под землей, а затем использовать механическую энергию движущихся воздушных потоков. Другой путь — гидроаккумулирующие сооружения: вода закачивается в поднятый высоко резервуар (водохранилище), сброшенная оттуда, она возвращает энергию.

Проблему выравнивания энергии можно решать и другими способами, но, как правило, у них у всех один общий недостаток — большая инерционность процессов: ими трудно управлять. А вот электрохимические генераторы лишены этого недостатка. Только вот маленькая загвоздка — для выравнивания ритмов городской энергетики необходимы ЭЭС-гиганты: мощностью в десятки мегаватт. А их пока еще нет.

Да, таких электрохимических исполинов пока нет, но, когда их начнут монтировать, это будет необычный процесс. Непривычный. ЭЭС можно, оказывается, собирать на специальных заводах, как, скажем, автомобили.

Строительство мощной тепловой электростанции требует места, и немалого, большого времени, больших капиталовложений. Массовое же производство электрохимических бутербродов, их быстрый монтаж в модули и колонны можно осуществить на заводе поточно. И быстро доставить к месту практически готовую электростанцию. Ясно, что и стоимость такой ЭЭС должна быть значительно ниже. Модульная структура существенно повысит эксплуатационную надежность таких электростанций и позволит производить текущий ремонт без остановки всей станции.

Важность проблемы энергоснабжения городов быстро возрастает. По данным ООН, к концу века в городах будет жить вдвое больше людей, чем сейчас. В развитых странах на долю городов придется три четверти

всего населения, в развивающихся странах — около половины.

Причем города достигнут грандиозных, умопомрачительных размеров. В 2000 году список их будет, очевидно, возглавлять Мехико с населением 31(!) миллион человек. Далее будут следовать Сан-Пауло (25,8 миллиона), Токио (24,2 миллиона), Нью-Йорк (22,8 миллиона), Шанхай (22,7 миллиона). Как следствие такой урбаакселерации резко пойдет вверх и необходимость в ЭЭС, этих легко откликающихся на потребу городов новых источников электроэнергии.

«ТАРДЖЕТ» И ДРУГИЕ

Кто-то должен начать. Самая блестящая научная и техническая идея останется фантазией, пока за нее не возьмется инженер. И вот в последние годы за рубежом в различых журналах, связанных с энергетикой, техникой, замелькали непривычные, броские заголовки статей: «Использование топливных элементов для выработки электроэнергии — мечта или реальность?»; «Топливные элементы — фаворит в энергетической скачке?» И тому подобное.

В условиях уже достаточно резко выраженного энергетического кризиса и обострения экологических проблем в ведущих капиталистических странах (США, ФРГ, Японии) начаты исследования вопроса о возможной роли топливных элементов в Большой энергетике.

В 1967 году, когда многие организации, занимавшиеся топливными элементами и работавшие на космос, начали свертывать свою деятельность и дух уныния воцарился над этой проблемой, американская фирма «Юнайтед технолоджи корпорейшн», объединившись с консорциумом газовых и электрических компаний, создала проект «Тарджет».

Слово «Target» составлено из начальных букв слов «Team to Advance Research for Gas Energy Transformation». Что-то вроде: «Группа, занятая перспективными исследованиями по преобразованию энергии газа».

Организаторы проекта, что называется, смотрели в корень. Природный газ стал в энергетике едва ли не центральной фигурой. Отсюда вытекает задача — использовать его высокоэффективно, экологически чисто.

Проект «Тарджет» действует уже около 15 лет. В нем

было занято около 800 специалистов. На разработки истрачена громадная сумма — порядка 140 миллионов долларов (сумма, сравнимая с затратами на топливный элемент в период осуществления программы «Аполлон»).

Исследования велись с постепенным наращиванием мощности проектируемых установок. В 1972—1973 годы было изготовлено более 60 модулей по 12,5 киловатта каждый. Затем был взят курс на 40-киловаттные устройства. 50 таких станций прошли испытания с 1979 по 1981 год. Конечная цель этих работ — создание предпосылок для использования газа в качестве носителя энергии.

«Тарджет» — не единственный проект такого рода. В 1971 году была принята другая программа — FCG (первые буквы слов «Fuel Cell Generator» — «генераторы на топливных элементах»). Проект «Тарджет» поддерживали в основном газовые компании, программу FCG финансировали компании электрические.

В 1967—1977 годы была построена и успешно испытана станция мощностью в один мегаватт. Следующий шаг — электростанция на топливных элементах мощностью 4,8 мегаватт из 460 электрохимических «сандвичей», объединенных в модули-колонны по 200—500 киловатт каждый при напряжении 250—500 вольт. При последовательно-параллельном соединении модулей — два блока по 10 электрохимических колонн в каждом — можно получить мегаваттные мощности и напряжение 2000—3000 вольт.

ЭКСПЕРИМЕНТ-ЭКЗАМЕН

Широка река научно-технического прогресса. Есть у нее стремительные повороты, странные и порой необъяснимые. Похоже, что загнанные в «резервации», «истребленные» для нужд Большой энергетики электрохимические устройства в образе топливных элементов собираются теперь дать бой тепловым машинам на их же собственной территории.

Третья американская долговременная программа «Utility» («Польза») поставила своей целью осуществить заветную мечту электрохимиков — поставить на промышленную основу «холодное» (на топливных элементах) горение угля в кислороде воздуха. И не в виде

лабораторных образчиков, дразнящих воображение, но не выдерживающих практической проверки. Примерно в 1990-х годах должна быть построена электростанция мощностью в 635 мегаватт.

Электрохимическая энергетика только начинается, но ученые уже размышляют об энергоустановках второго и третьего поколений.

Пока идет работа над топливными элементами первого поколения с фосфорнокислым электролитом. Эти элементы функционируют при температурах 120—130 градусов Цельсия, давлении газа, близком к атмосферному.

Отдельные электрохимические ячейки устроены так. Концентрированным водным раствором кислоты пропитывается тонкий слой пористого вещества-носителя. Он заключен между пористыми угольными электродами, на которые нанесен тонкий слой катализатора — платины: 0,3—0,8 миллиграмма на квадратный сантиметр внешней поверхности электрода. Мощность такого элемента 0,1—0,2 ватта с одного квадратного сантиметра площади электродов, напряжение — 0,64 вольта. Таковы характеристики отдельного электрохимического «бутерброда».

Теперь о кпд. Увы, у первого поколения энергоустановок на топливных элементах он не очень высок — порядка 40 процентов. Это еще не резкий скачок в сравнении с традиционными устройствами, где при использовании паровой турбины кпд колеблется от 23 до 38 процентов. В среднем по нашей стране кпд тепловых электростанций — без ТЭЦ —33,4 процента.

Где же обещанные почти 100-процентные значения кпд? — вправе спросить читатель.

Для ответа на этот вопрос придется войти в некоторые подробности.

Энергоустановки на основе топливных элементов состоят из трех главных компонентов: системы подготовки топлива, собственно электрохимического генератора (ЭХГ) и преобразователя тока. Последний необходим, так как топливный элемент генерирует постоянный ток, его надо превращать в переменный.

В системе подготовки топлива нефть или природный газ сначала очищают от серы, а затем подают в каталитический паровой риформер, где происходит конверсия

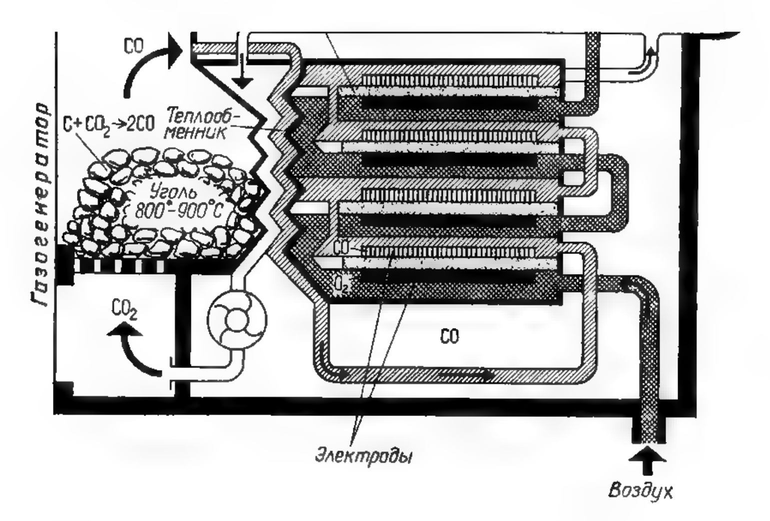


Схема электростанции будущего на топливных элементах: топливо для работы высокотемпературного топливного элемента — окись углерода — вырабатывается предварительно в газогенераторе

топлива. В результате образуется смесь горючих газов, эта смесь и поступает в анодные камеры топливных элементов.

Кпд всей системы, естественно, зависит от кпд каждой из трех ее составляющих. Значительная часть энергии уходит на приготовление водорода, оттого-то общий кпд ЭЭС и оказывается не столь высоким.

Но и в таком виде эти установки обладают рядом несомненных достоинств. Вредные выбросы (окислы азота и серы) от топливных элементов составляют лишь 0,1 до 0,00002 от выбросов обычных электростанций, работающих на природном топливе. Для работы топливных элементов первого поколения не требуется воды для охлаждения. Станции на топливных элементах будут дешевле, да и потери при передаче энергии будут ниже, так как эти станции можно располагать в непосредственной близости от потребителей.

Если бы удалось электростанции на топливных элементах объединить с каким-нибудь вторичным устройством,

например с тепловым насосом, который бы утилизировал выделяющееся при работе топливных элементов тепло, то используемое тепло компенсировало бы энергетические затраты на конверсию исходного топлива. Но сделать это на установках первого поколения трудно: их температура низка.

И специалисты начали работу над вторым поколением. Тут в качестве электролита уже будут использоваться расплавы карбонатов. Топливные элементы поэтому смогут работать при температурах 500—750 градусов Цельсия (водные растворы электролитов выдержать подобных условий, очевидно, не могут), с суммарным кпд уже в 40—55 процентов. Другое достоинство таких высокотемпературных систем — способность работать на топливе, не очищенном от примесей, возможность обходиться без дорогостоящих катализаторов из благородных металлов.

Но ученые и инженеры смотрят и в более отдаленное будущее — в «угольную эпоху», когда нефть и газ истощатся. Видимо, уже лет через 10—20 появится и третье поколение ЭХГ (с твердым окисным электролитом), которые будут работать при температурах выше 750 градусов. У таких установок кпд превысит 60 процентов, и они смогут действовать совместно с газификаторами угля. Это будут уже мастодонты электрохимической энергетики мощностью в сотни мегаватт.

Не надо думать, будто бы третье поколение — бесплодная мечта энергетиков, фантазия, которая никогда не будет воплощена в жизнь. В 1978 году фирма «Вестингауз» (США) закончила первые испытания подобных устройств — испытания длились свыше 750 часов.

Но и наивно, конечно, полагать, что в электрохимической энергетике все идет гладко. Состояние любой из этих разработок оценивается обычно по трем параметрам: сколько килокалорий тратится при сжигании топлива на получение киловатт-часа полезной энергии (очевидно, что эта величина должна быть по возможности максимально низкой; по оценкам, для станции в 4,8 МВт она на номинальном режиме составит около 9,8 МДж на кВт·ч), величине капитальных затрат на получение киловатта мощности и, наконец, сроку службы.

Стоимость энергоустановок на топливных элементах пока еще велика, поскольку в пористых электродах используются дорогостоящие катализаторы платиновой

группы. Только они обладают высокой активностью при низких (сотни градусов) температурах и одновременно способны противостоять кислотам, содержащимся в растворе электролита. Поэтому, как мы уже говорили, сейчас ведутся энергичные поиски более дешевых катализаторов.

Проектная стоимость установок на топливных элементах с фосфорнокислым электролитом оценивается в 400 долларов на киловатт. Стоимость первых образцов установки в Нью-Йорке, по-видимому, будет составлять примерно 1500 долларов за киловатт.

Если же говорить о сроках службы, то и этот показатель еще далек от желаемого. Демонстрационная установка в Нью-Йорке сможет, вероятно, проработать всего 6700 часов, а необходим ресурс в 40 тысяч часов, то есть работа в течение примерно 4,5 года: ведь обычный рабочий срок для ТЭС — десятки лет.

И все же как заманчива идея электрохимической энергетики! Если технические проблемы будут преодолены и топливные элементы окажутся экономически жизнеспособными, то в будущем американцы намереваются построить и подключить к общенациональной электросети целый ряд таких электростанций общей мощностью 20 гигаватт. Прогнозируют, что это даст в производстве электроэнергии ежегодную экономию около 16 миллионов кубометров нефти. Не говоря уже об экологических преимуществах и прочих (уже отмечавшихся) достоинствах топливных элементов.

Сегодня электрохимическая энергетика еще только начинается. Пока идет очень сложный и дорогой эксперимент-экзамен. Он должен ответить на вопрос, созрели ли топливные элементы и основанный на них электрохимический способ генерирования тока для того, чтобы в энергетику равноправно вошел новый класс установок — электрохимических. Показательно, что масштабы решаемой проблемы и сложность возникающих при этом задач оказались под силу лишь немногим фирмам и научным учреждениям мира, и сейчас такие исследования ведутся лишь в США, СССР и ФРГ.

Коммерческий интерес к электрохимической энергетике проявляют и японские фирмы. По их заказу американские специалисты монтируют в Токио второй усовершенствованный образец электростанции на 4,8 мегаватта.

ДОБРО ПОЖАЛОВАТЬ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГЕТИКА!

С 21 по 25 июня 1982 года в Москве в помещении Центрального дома туриста проходила 6-я Всесоюзная конференция по электрохимии. Ее открыл академик Яков Михайлович Колотыркин.

Ученые (прибыли и иностранные гости из Чехословакии, Польши, ГДР, ФРГ, Италии, Японии и других стран) отчитывались о работе, проделанной ими со времени последнего (1975 год) совещания, демонстрировали созданные ими электрохимические приборы.

900 участников из 42 городов страны прочли и обсудили сотни докладов. Один из них очень заинтересовал автора этой книги. Доклад назывался «Перспектива производства электрической и тепловой энергии электростанциями на топливных элементах».

Собравшимся были представлены схемы вроде бы обычной электростанции. На них были условно обозначены парогенератор, турбины — паровая, газовая...

— Нет, схожесть эта обманчива,— сказал докладчик.— Смотрите: уголь не сжигается сразу, а в виде пыли подается в газогенератор. В нем под действием кислорода и водяных паров образуются горючие газы. Это и есть топливо для нашей электростанции.

— Но какой в этом прок? — был задан вопрос.— Мы ждем от электростанции энергии, а тут все наоборот: на превращение угля в газ нужно затратить уйму тепла, той же энергии!

— Энергию с лихвой возвратят нам топливные элементы...— возразил докладчик.

Позже автору удалось познакомиться и побеседовать с докладчиком — Рустамом Беровичем Ахмедовым, первым заместителем директора Государственного научно-исследовательского института (ЭНИН) имени Г. М. Кржижановского, доктором технических наук, профессором. Побывать в ЭНИНе.

— Нас, энергетиков, очень заинтересовали топливные элементы,— сказал Ахмедов.— Тут, казалось бы, есть шанс убить сразу трех зайцев: вернуться к углю, сделать энергетику экологически чистой (электрохимическое сжигание в кислороде воздуха водорода и угарного газа — продуктов газификации угля — дает лишь во-

ду и углекислоту) и высокоэкономичной. Для этого наш институт и занялся предварительной комплексной оценкой перспектив создания электростанций (ЭС) на топливных элементах (ТЭ)...

Дело это было для энергетиков новым, непривычным. Оно потребовало инициативы, сметки, творческого подхода, синтеза ряда энергетических идей. Важно было не просто логически продумать этот необычный проект, но и провести его оптимизацию. Но недаром ЭНИН занимается лишь перспективной энергетической тематикой (солнечная, геотермальная и другие новинки), настроен на все новое, головной по этим проблемам. Сотрудники института в короткие сроки проработали и проект с топливными элементами.

В творческом содружестве с исследователями из научно-производственного объединения «Квант», которые занимаются созданием топливных элементов и предоставили энергетикам всю необходимую информацию, сотрудники ЭНИНа занялись расчетами и получили следующие обнадеживающие результаты.

Оказалось, что даже сейчас на топливных элементах первого поколения кпд ЭС на ТЭ могут превышать на 5—10 процентов показатели лучших современных тепловых ЭС, что может обеспечить экономию до 20—25 процентов топлива на каждый выработанный киловатт-час электроэнергии. И это при капиталовложениях в их сооружение только в 1,5—2 раза больших, чем при строительстве традиционных ЭС. Однако с учетом высоких значений кпд и дальнейшей тенденции к снижению стоимости основного оборудования электростанции на топливных элементах уже сейчас могут рассматриваться как один из альтернативных источников энергии.

Немаловажны и другие соображения. В тепловых схемах таких электростанций может использоваться стандартное теплотехническое оборудование, проектирование и создание которого на данном этапе легко реализуемо.

Я при встрече напомнил Ахмедову про аналогичные работы, которые ведутся сейчас в США.

— Есть большая разница между американскими работами и нашей,— сказал Ахмедов.— Установка в США рассчитана на демонстрацию, рекламу, на привлечение в это дело частного капитала. Предполагалось, что топливом в ЭС будет нефть или природный газ. По этим и

по другим причинам электроэнергия, которую вырабатывают в ней десятки электрохимических колонн, еще очень дорога. Ясно, такие устройства годны лишь для специальных применений. Мы же взяли курс на уголь и на Большую энергетику (станции от 500 до 3000 мегаватт), а потому старались сделать ЭС на ТЭ конкурентоспособными с традиционными теплоэнергоустановками. В основу проекта мы положили следующий, как нам кажется, правильный принцип. Музыку, так сказать, заказывает топливный элемент — наиболее эффективная в смысле преобразования энергии, но в то же время и наиболее дорогостоящая пока часть. Именно ТЭ диктуют, каков должен быть окружающий их энергетический антураж. Нами просчитаны различные варианты: топливные элементы, действующие с кислыми, щелочными электролитами, с расплавами. И вот взгляните сами (Рустам Берович придвинул ко мне стопку чертежей): при изменении типа ТЭ существенно меняется и вся энергетическая конструкция. К сожалению, топливные элементы еще не умеют кормиться углем. Эти в общем-то всеядные создания пока всему предпочитают в качестве топлива газы, особенно водород. Поэтому в нашей схеме и стоит газогенератор. Но ту энергию, которую вынуждены здесь потратить, мы (и тут коренное отличие нашего проекта от американского) хотим практически полностью вернуть. Взять буквально каждую калорию на учет. Синтез-газ (смесь водорода, угарного газа и других примесей) получается при температурах 1500—1600 градусов Цельсия, таким образом, он обладает не только химической, но и большой тепловой энергией. Топливные же элементы для своей работы требуют температур гораздо более низких. Потому в схеме и представлены паровая и газовая турбины: «каскадированный» метод решения позволяет последовательно превращать тепло охлаждающегося газа в электроэнергию. И в общем балансе топливные элементы дают 50—70 процентов...

Начато большое, перспективное дело. При расчетах в качестве продуктов газификации в энергетическом проекте были взяты угли типа тех, которые добываются под Красноярском в гигантском Ирша-Бородинском угольном разрезе. Такое богатство Сибири, как бурые угли КАТЭКа, обладающие большой зольностью и низкой теплотворной способностью (сжигать их обычными методами дело сложное), могло бы стать полигоном для ЭС

на ТЭ. Но где бы они ни начали работать, первый, может быть, самый важный шаг сделан. Энергетики ЭНИНа доказали принципиальную возможность создания экономичных рентабельных электростанций на топливных элементах.

Добро пожаловать, электрохимическая энергетика!

* * *

В заключение приведем мнение об электрохимической энергетике наших ведущих специалистов в этой области — члена-корреспондента АН СССР Н. С. Лидоренко и доктора технических наук Г. Ф. Мучника, авторов вышедшей недавно (1982) монографии «Электрохимические генераторы».

«Главная задача, стоящая перед создателями электростанций с электрохимическими генераторами,— пишут они,— продемонстрировать экологически чистый источник энергии и показать возможность более эффективного, в сравнении с существующими тепловыми электростанциями и дизельными установками, использования энергии топлив».

И далее:

«Сегодняшний период можно назвать лишь начальным этапом огромной индустрии безмашинных способов получения электричества. В перспективе ожидается дальнейшее расширение исследований в этой области. Электрохимический генератор — экологически чистая и малометаллоемкая электрогенерирующая модель, которая займет одну из основных позиций в энергетике будущего».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вильгельм Оствальд, горячо пропагандируя идею топливных элементов, предупреждал: иначе человечество будет погребено под промышленной и «энергетической» грязью, иначе крыши домов будут покрыты слоем копоти, а города окутаны дымом.

Во многом заблуждался Оствальд, но он был, видимо, прав, предсказывая большие перспективы для электрохимической энергетики. Ныне топливные элементы и подобные им электрохимические устройства (электрохимические ячейки, ведущие фотолиз — разложение воды

на водород и кислород под действием солнечных лучей, электрохимические «фотоэлементы», генерирующие электрический ток, но гораздо более дешевые, нежели кремниевые батареи) проходят полигонную обкатку, подвергаются проверке на живучесть, борются за право занять достойное место в энергетике будущего. И, судя по результатам научных и практических поисков, могут оказать определенное влияние на выбор «энергетического» сценария завтрашнего дня.

Каким он будет, этот сценарий, точно сказать пока трудно, хотя и ясно уже, что главную роль в нем будут играть такие энерготехнологии, которые позволят ограничить (а то и полностью исключить!) потребление невосполнимых запасов минерального топлива — прежде всего, нефти и природного газа — и которые не ведут к угрожающим здоровью людей изменениям природной среды.

* * *

При написании данной книги использованы материалы, разбросанные по самым различным изданиям — монографиям, публикациям в научной и научно-популярной периодике. По традиции научно-популярные книги не снабжаются ссылками на источники, да мне было бы и совсем непросто это сделать из-за их многочисленности (хотя основные источники названы в списке литературы). Поэтому мне остается, с одной стороны, поблагодарить авторов многих публикаций за невольно оказанную мне помощь в работе, а с другой — принести извинения за то, что я не во всех случаях смог на них сослаться.

Я искренне признателен кандидату химических наук А. М. Скундину, раскрывшему мне некоторые тонкости электрокатализа, доктору химических наук, профессору В. Е. Казаринову, который согласился быть научным редактором этой книги, и доктору экономических наук, профессору Ю. И. Корякину, с которым мы не раз обсуждали социальные и экономические аспекты энергетических проблем.

ЛИТЕРАТУРА

Багоцкий В. С., Скундин А. М. Химические источники тока. М., Энергоиздат, 1981.

Вопросы электрокатализа. М., Наука, 1980.

Давтян О. К. Проблема непосредственного превращения химической энергии топлива в электричество. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947.

Дамаскин Б. Б., Петрий О. А. Современная электрохимия. М., Наука, 1965.

Коровин Н. В. Электрохимические генераторы. М., Энергия, 1974.

Лидоренко Н. С., Мучник Г. Ф. Экологическая энергетика.— Природа, 1974, № 9.

Лидоренко Н, С., Мучник Г. Ф. Электрохимические генераторы. М., Энергоиздат, 1982.

Паланкер В. Ш. Холодное горение. М., Наука, 1972.

Панченко Е. И., Коровкин А. С. Космическая электроэнергетика. М., Знание, 1967.

Фильштих В. Топливные элементы. М., Мир, 1968.

Фрумкин А. Н., Багоцкий В. С., Иофа З. А., Кабанов Б. Н. Кинетика электродных процессов. М., Изд-во МГУ, 1952.

Чизмаджев Ю. А., Маркин В. С., Тарасевич М. Р., Чирков Ю. Г. Макрокинетика процессов в пористых средах (Топливные элементы). М., Наука, 1971.

Чизмаджев Ю. А., Пастушенко В. Ф. Современные достижения биоэлектрохимии. М., О-во «Знание» РСФСР, 1972.

Чизмаджев Ю. А., Чирков Ю. Г. Пористые электроды.— В кн.: Кинетика сложных электрохимических реакций. М., Наука, 1981.

Чирков Ю. Г. Электрохимическая энергетика.— Наука и жизнь, 1981, № 5, 6, 7.

Юсти Э., Винзель А. Топливные элементы. М., Мир, 1964.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Юрий Георгиевич ЧИРКОВ

ЛЮБИМОЕ ДИТЯ ЭЛЕКТРОХИМИИ

Главный отраслевой редактор *В. П. Демьянов*
Редактор *Н. Ф. Яснопольский*
Мл. редактор *Н. А. Васильева*
Художник *А. А. Астрецов*
Худож. редактор *М. А. Гусева*
Техн. редактор *Л. А. Солнцева*
Корректор *В. Е. Калинина*

ИБ № 7025

Сдано в набор 25.07.84. Подписано к печати 27.12.84. А 14314. Формат бумаги $84\times108^1/_{32}$. Бумага тип № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 9,24. Усл. кр.-отт. 9,56. Уч.-изд. л. 9,80. Тираж 50 000 экз. Заказ 4-316. Цена 35 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр. проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 857704.

Киевская книжная фабрика, 252054, Киев-54, вул. Воровского, 24.

35к.

Ю. ЧИРКОВ

ЛЮБИМОЕ ДИТЯ ЭЛЕКТРОХИМИИ